

MEMS-2: Čebyševov filter typu 1 — pásmový priepust

REFERÁT V RÁMCI PREDMETU
MODELOVANIE A SIMULÁCIE V ELEKTROTECHNIKE
LS 2022/23, 3. roč. Bc. AES

Yevgenii Chernozub, III. roč. Bc, APE

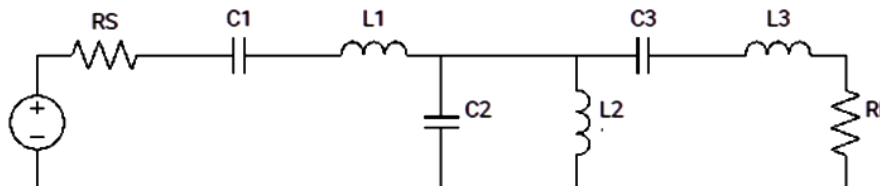
Odozvané dňa:		Bodov spolu:	Poznámka:
Hodnotenie: – správy	(max. 18b.)		
	– riešenia		
	(max. 14 b.)		
– prezentácie a prednesu		(max. 8 b.)	
Komentáre pri jednotlivých dátumoch kontroly správy:			
Dátum: ...			
• ...			
• ...			

Zadanie

Riešitelia: Chernozub Yevgenij

yevgenii.chernozub@student.tuke.sk;

Zadanie: Riešte zapojenie filtračného článku podľa obrázka:



Pre vyšetrovanie zvolte vhodné parametre obvodu, pri ktorých sa začínajú prejavovať jeho frekvenčné vlastnosti. Prekreslite tento obvod s použitím značiek podľa normy.

Správa musí obsahovať nasledovné výstupy:

- 1) Úvod (príp. pohľadajte na internete riešenia podobného obvodu stručne ich komentujte).
- 2) Zostavenie rovníc obvodu a z nich odpovedajúcu maticovú rovnicu s impedanciami obvodu: (1) metódou slučkových prúdov (MSP) a (2) metódou uzlových napätí (MUN).
- 3) Nájdenie TF aplikáciou MSP a MNU v symbolickom MATLABe. Uveďte ju: (1) v symbolickom tvare a (2) v numerickom tvare pre zvolené hodnoty parametrov ($\mathbf{a}_0 = \mathbf{1}$).
- 4) Pre získanú TF nakresliť PrCh a odpovedajúce LFCh. Popíšte ich priebeh a uveďte, o aký obvod ide. V tabuľke pod grafom uveďte hodnoty núl a pólov pre základné hodnoty parametrov.
- 5) Vyšetrenie závislosti zmien vlastností obvodu (PrCh a LFCh) pri zmene zvoleného parametra (\mathbf{L} , \mathbf{C}) – cca 2 až 5x väčšia a menšia hodnota, pričom ostatné parametre obvodu sa nemenia. Podobne zmeňte jeden ďalší parameter a slovne analyzujte, či výsledok zodpovedá predpokladom a prečo.
- 6) Odozvy obvodu na harmonický signál pri cca troch rôznych frekvenciách zvolených tak, aby vystihovali frekvenčné vlastnosti obvodu (kde sa prejavuje výrazná zmena fázy, príp. zmena amplitúdy LFCh). Zobrazte iba niekoľko amplitúd (max. 4).
- 7) Odvodenie stavového modelu obvodu.
Overte správnosť riešenia s výsledkami získanými v bode 3 (musia byť rovnaké).
- 8) Odvodenie simulačného modelu z rovníc obvodu (nie z TF!) a simulácia obvodu v Simulinku pri základných hodnotách parametrov (výstup v MATLABe pomocou bloku To Workspace). Porovnajte s výsledkami získanými v bode 3 (musia byť rovnaké).
- 9) Ten istý experiment urobte pri napájaní obdĺžnikovým napätím s rovnakými frekvenciami.
- 10) Odozvu obvodu v Simulinku na harmonický signál s narastajúcou frekvenciou (chirp) vo zvolenom rozsahu, aby vystihoval vlastnosti LFCh.
- 11) Simuláciu obvodu pomocou programu Simscape.
- 12) Zostavenie GUI v MATLABe umožňujúceho pohodlnú a rýchlu analýzu obvodu.
- 13) V závere dôsledne analyzujte dosiahnuté výsledky (o aký obvod ide, aké boli použité metódy riešenia, aké sú dosiahnuté výsledky, aký majú vplyv jednotlivé parametre na zmenu vlastností a pod.).

Obsah

Zadanie	2
Obsah.....	3
Zoznam symbolov a skratiek.....	4
Zoznam použitých obrázkov	5
Zoznam použitých tabuliek	6
1 Úvod	7
1.1 Návrh Čebyševovho pásmového filtra	8
2 Matematický model	10
2.1 Operátorové impedancie súčiastok R, L, C.....	10
2.2 Metóda slučkového prúdu	12
2.3 Metóda uzlového napätia	16
3 Zmena parametrov dynamického systému	22
4 Model v Simulinku	26
5 Odvodenie stavového modelu systému	30
5.1 Stavový popis systému	30
5.2 Zostavenie stavového modelu elektrického systému	30
5.3 Zostavenie priebehov LFCh a PrCh stavového modelu s pomocou MATLABu a Simulinku	32
6 Odozva systému na harmonický budiaci signál	35
6.1 Analýza LFCh	35
6.2 Odozvy	36
6.3 Odozva na obdĺžnikový signál	38
7 Odozva obvodu na harmonický signál s narastajúcou frekvenciou (chirp).....	41
8 Model v Simscape	43
9 Grafický používateľský interfes (GUI).....	45
Záver.....	47
Zoznam použitej literatúry	48
Prílohy	49

Zoznam symbolov a skratiek

Symbole

A	matica systému (v stavovom popise)
b, B	vstupný vektor, vstupná matica
ct, C	výstupný vektor (transponovaný), výstupná matica
C	kapacita
$f(t), F(s)$	sila - časová funkcia, operátorový obraz, funkcia [N]
$F(s)$	prenosová funkcia
$G(s)$	prenosová funkcia
$i(t), I(s)$	prúd - časová funkcia [A] operátorový obraz
L	Lagrangeova funkcia, indukčnosť [H]
m	hmotnosť, rád čitateľa prenosovej funkcie [kg]
q	náboj, zovšeobecnená súradnica [C]
s	Laplaceov operátor
t	čas [s]
T	časová konštanta, kinetická energia
Δ	
$u(t), U(s)$	napätie - časová funkcia, operátorový obraz [V]
$x(t), X(s)$	stavová veličina – časová funkcia, operátorový obraz
$Z(s)$	impedancia, operátorový obraz [Ohm]
$y(t), Y(s)$	výstupná veličina

Grécke písmená

φ	uhol [°]
$\omega(t), \omega(s)$	uhlová rýchlosť [ras/s]

Horné indexy

T	transponovaný
-----	---------------

Skratky

GUI	(Graphical User Interface) – grafický používateľský interfejs
PrCh	Prechodová charakteristika
LFCh	Logaritmickej frekvenčnej charakteristiky
KZ	Kirchhoffov zákon
BW	(Bandwidth) šírka pásma

Zoznam použitých obrázkov

Obr. 1.1 Čebyševov filter charakteristika.....	7
Obr. 2.1 Elektrický obvod filtra	11
Obr. 2.2 Elektrický obvod filtra so zjednodušenou impedanciou Z_e	12
Obr. 2.3 Popis slučkových prúdov	13
Obr. 2.4 Popis slučkových prúdov vo forme operátorov Laplace.....	13
Obr. 2.5 Popis prúdov v uzle A	17
Obr. 2.6 Popis prúdov v uzle A vo forme operátorov Laplace	17
Obr. 2.7 Elektrický obvod so zjednodušenými impedanciami.....	18
Obr. 2.8 Prechodová logaritmicko frekvenčná charakteristiky	20
Obr. 2.9 Vlastnosti LFCh	21
Obr. 3.1.1 Priebehy PrCh a LFCh pri zmene parametrov L_1 a L_3	22
Obr. 3.2 Priebehy PrCh a LFCh pri zmene parametra L_2	23
Obr. 3.3 Priebehy PrCh a LFCh pri zmene parametrov L_1 , L_2 a L_3	23
Obr. 3.4 Priebehy PrCh a LFCh pri zmene parametrov C_1 , C_2 a C_3	24
Obr. 3.5 Priebehy PrCh a LFCh pri zmene parametra R_{out}	24
Obr. 3.6 Priebehy PrCh a LFCh pri zmene parametra R_{in}	25
Obr. 4.1 Elektrický obvod filtra	26
Obr. 4.2 Simulačná schéma paralelnej LC impedancie Z_e	27
Obr. 4.3 Simulačná schéma pre prvú slučku	27
Obr. 4.4 Simulačná schéma pre prvú slučku	28
Obr. 4.5 Simulačná schéma pre uzol A	28
Obr. 4.6 Finálna simulačná schéma v Simulink	28
Obr. 4.7 PrCh zo schémy v Simulink.....	29
Obr. 5.1 Elektrický obvod filtra s popisom stavových veličín	30
Obr. 5.2 PrCh a LFCh odvodené zo stavového popisu	34
Obr. 6.1 LFCh systému zosilneného o hodnotu 2.85.....	35

Obr. 6.2 Rozdiel signálov pri frekvencii $\omega = 1.45e7 \text{ rad/s}$	36
Obr. 6.3 Rozdiel signálov pri frekvencii $\omega = 1.53e7 \text{ rad/s}$	36
Obr. 6.4 Rozdiel signálov pri frekvencii $\omega = 1.57e7 \text{ rad/s}$	36
Obr. 6.5 Rozdiel signálov pri frekvencii $\omega = 1.45e7 \text{ rad/s}$	37
Obr. 6.6 Rozdiel signálov pri frekvencii $\omega = 1.53e7 \text{ rad/s}$	37
Obr. 6.7 Rozdiel signálov pri frekvencii $\omega = 1.57e7 \text{ rad/s}$	37
Obr. 6.8 Rozdiel signálov pri frekvencii $\omega = 1.51e7 \text{ rad/s}$	38
Obr. 6.9 Rozdiel signálov pri frekvencii $\omega = 1.7e7 \text{ rad/s}$	38
Obr. 6.10 Odozva na obdĺžnikový signál $\omega = 1.45e7 \text{ rad/s}$	39
Obr. 6.11 Odozva na obdĺžnikový signál $\omega = 1.53e7 \text{ rad/s}$	39
Obr. 6.12 Odozva na obdĺžnikový signál $\omega = 1.57e7 \text{ rad/s}$	39
Obr. 6.13 Odozva na obdĺžnikový signál $\omega = 1.7e7 \text{ rad/s}$	40
Obr. 7.1 Schéma v Simulink pre odozvu na <i>Chirp</i> signál	41
Obr. 7.2 Nastavenie v bloku Chirp Signal	41
Obr. 7.3 Odozva na Chirp Signál	42
Obr. 8.1 Elektrický obvod systému v Simscape	43
Obr. 8.2 PrCh z modelu v Simscape	44

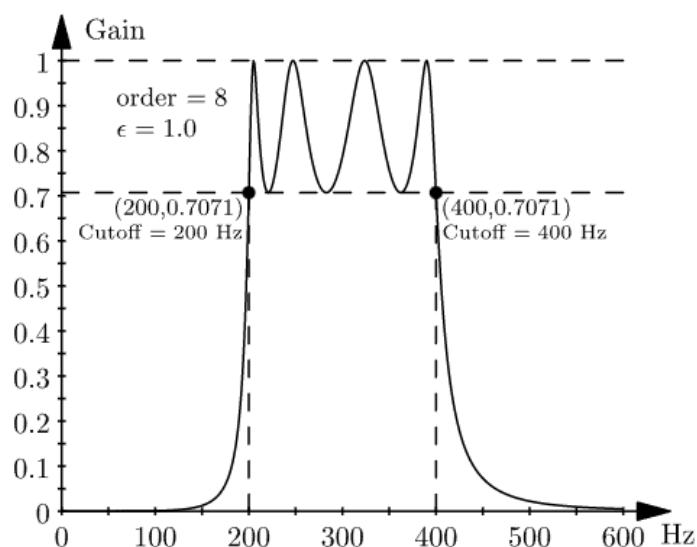
Zoznam použitých tabuliek

Tab. 1 Nuly a poly prenosu	16
----------------------------------	----

1 Úvod

Elektrický systém, ktorý budeme v tejto práci skúmať a modelovať, je reprezentáciou Čebyševovho filtra. Na začiatok zvážime, aký druh filtra je a aký je jeho princíp fungovania.

Čebyševov filter je typ elektronického filtra, ktorý je navrhnutý tak, aby mal ostrý prechod medzi priepustným pásmom (kam môže signál prechádzať) a stop pásmom (kde je signál zoslabený alebo blokovaný). Je pomenovaný po ruskom matematikovi Pafnuty Čebyshev, ktorý ako prvý opísal matematické princípy, ktoré stoja za návrhom tohto typu filtra.



Obr. 1.1 Čebyševov filter charakteristika

Čebyševov filter dosahuje svoje ostré obmedzenie tým, že umožňuje zvlnenie v priepustnom pásme, čo znamená, že odozva filtra sa odchyľuje od ideálnej odozvy, aby sa dosiahol strmší prechod. Tento kompromis medzi strmosťou medznej hodnoty a veľkosťou zvlnenia v priepustnom pásme je riadený parametrom známym ako „poradie“ filtra.

Čebyševove filtre sa bežne používajú v rôznych aplikáciách, vrátane spracovania zvuku a videa, telekomunikácií a riadiacich systémov, kde sa vyžaduje ostrý prechod medzi priepustným a stoppásmovým pásmom. Sú užitočné najmä v situáciách, keď signál obsahuje vysoké aj nízke frekvencie, pretože dokážu tieto frekvencie efektívne oddeliť a zároveň minimalizovať skreslenie a stratu signálu.

Návrh Čebyševovho filtra zahŕňa výber vhodného poradia filtra, veľkosti zvlnenia a medznej frekvencie, aby spĺňali požadované špecifikácie filtra. Tu sú všeobecné kroky pri navrhovaní Čebyševovho filtra:

- Určenie typu a poradia filtra: Rozhodnite sa pre typ Čebyševovho filtra (dolnopriepustný, hornopriepustný, pásmový alebo pásmový) a poradie filtra (zvyčajne určené podľa požadovaného útlmu a medznej frekvencie).

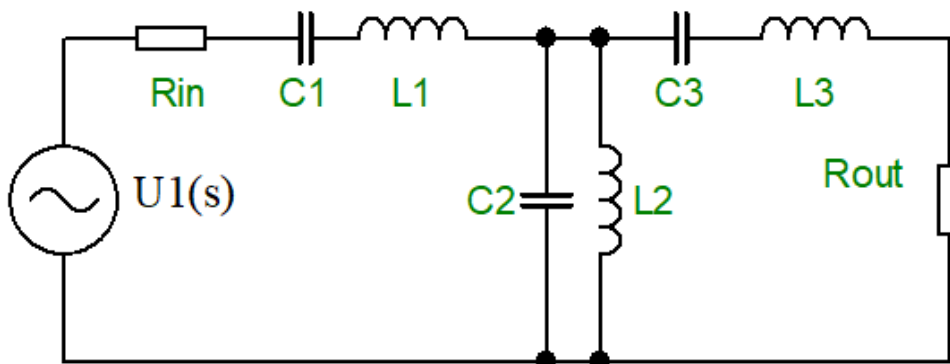
- Vypočítajte veľkosť zvlnenia: Veľkosť zvlnenia v priepustnom pásme je riadená veľkosťou zvlnenia. Vypočítajte veľkosť zvlnenia na základe požadovaných charakteristík priepustného pásma, ako je útlm priepustného pásma a útlm nepriepustného pásma.
- Vypočítajte medznú frekvenciu: Určite medznú frekvenciu na základe požadovanej frekvenčnej odozvy filtra. Medzná frekvencia je frekvencia, pri ktorej odozva filtra prechádza z priepustného pásma do nepriepustného pásma.
- Výpočet koeficientov filtra: Na výpočet koeficientov filtra, ktoré definujú prenosovú funkciu filtra, použite Chebyshevove rovnice návrhu filtra.

Implementujte filter: Implementujte filter pomocou vypočítaných koeficientov a komponentov obvodu, ako sú odpory, kondenzátory a tlmivky.

1.1 Návrh Čebyševovho pásmového filtra

V budúcnosti sa budeme musieť zaoberať výberom parametrov pre náš elektrický obvod. Na internetových zdrojoch sme našli video[1], ktoré navrhovalo spôsob výpočtu parametrov nášho filtra.

Metóda spočíva v tom, že časti obvodu, kde sú cievka a kondenzátor zapojené do párov v sérii alebo paralelne, sú nahradené hodnotou g .



Ďalej vypočítame hodnotu každého prvku pomocou nasledujúcich vzorcov:

Na zapojenie komponentov do série:

$$L_i = \frac{g_i R_0}{\omega_0 \Delta} \quad (2.1)$$

$$C_i = \frac{\Delta}{\omega_0 g_i R_0} \quad (2.2)$$

Pre paralelné zapojenie komponentov:

$$L_i = \frac{R_0 \Delta}{g_i \omega_0} \quad (2.1)$$

$$C_i = \frac{g_i}{\omega_0 \Delta R_0} \quad (2.2)$$

kde:

R_0 - impedancia cievky;

ω_0 - frekvencia kmitania, ktorá je vyjadrená pomocou tzv. frekvencie stredu, ktorú potrebujeme;

Δ - šírka pásma

Výhodou tejto techniky je, že hodnoty g sú už vypočítané (Tab. 1.1), takže pomocou hotových tabuliek môžeme vypočítať hodnoty komponentov pre Chebyshev filter s rôznymi charakteristikami. V tomto prípade sme sa rozhodli použiť dáta na filter so zvlnením 3dB[2].

Order ripple	N=3		
	0,2 dB	1,0 dB	3,0 dB
g_1	1.22754	2.02359	3.34874
g_2	1.15254	0.99410	0.71170
g_3	1.22754	2.02359	3.34874

Tab. 1.1 Tabuľka hodnôt g

V tejto časti sme vysvetlili, ako sme v našej práci získali realne hodnoty komponentov pomocou tejto techniky.

2 Matematický model

Modelovanie elektrických systémov zahŕňa vytváranie matematických reprezentácií elektrických obvodov alebo systémov na analýzu ich správania a predpovedanie ich výkonu v rôznych podmienkach. Ako už bolo uvedené, náš elektrický systém je reprezentáciou Čebyševovho filtra. V nasledujúcich kapitolách budeme rôznymi spôsobmi modelovať procesy prebiehajúce v systéme.

Táto kapitola sa bude zaoberať nasledujúcimi bodmi:

- 1) Identifikujte komponenty systému: Identifikujte komponenty, ktoré tvoria elektrický systém, ako sú odpory, kondenzátory, induktory a zdroje napätia a prúdu.
- 2) Definujte rovnice systému: Napíšte rovnice, ktoré popisujú správanie každej zložky v systéme na základe ich elektrických vlastností a fyzikálnych zákonov, ktorými sa riadi ich činnosť. Napríklad Ohmov zákon možno použiť na opis správania rezistora, zatiaľ čo vzťah medzi napätím a prúdom pre kondenzátor možno opísať pomocou Kirchhoffovho zákona.
- 3) Zostavte model systému: Použite rovnice komponentov na zostavenie matematického modelu elektrického systému, čo môže zahŕňať vytvorenie schémy zapojenia alebo blokovej schémy systému.
- 4) Simulácia modelu systému: Pomocou simulačného softvéru spustíte simulácie modelu systému a analyzujete správanie systému v rôznych podmienkach, ako sú zmeny hodnôt komponentov, vstupných signálov alebo faktorov prostredia.

2.1 Operátorové impedancie súčiastok R, L, C

Štruktúra systému obsahuje pasívne elektrické prvky rezistor, cievka a kondenzátor, preto zvážime základné vzorce pre procesy prebiehajúce vo vnútri týchto prvkov. Tieto vzorce sú základné a vyjadrujú vzťah medzi prúdom a napätím v každom prvku[3].

Pre rezistor:

$$u_R(t) = Ri(t) \quad (2.1)$$

$$i(t) = \frac{1}{R}u_R(t) \quad (2.2)$$

Po Laplaceovej transformácii budú mať tvar:

$$U_R(s) = RI(s) \quad (2.5)$$

$$I(s) = \frac{1}{R}U_R(s) \quad (2.6)$$

$$Z_R(s) = R \quad (2.7)$$

Pre Kondenzátor:

$$u_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau \quad (2.1)$$

$$i(t) = C \frac{du_C(t)}{dt} \quad (2.2)$$

Po Laplaceovej transformácii rovnice budú mať tvar:

$$U_C(s) = \frac{1}{Cs} I(s) \quad (2.5)$$

$$I(s) = Cs U_C(s) \quad (2.6)$$

$$Z_R(s) = \frac{1}{Cs} \quad (2.7)$$

Pre cievku:

$$u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad (2.1)$$

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t u_L(\tau) d\tau \quad (2.2)$$

Po Laplaceovej transformácii rovnice budú mať tvar:

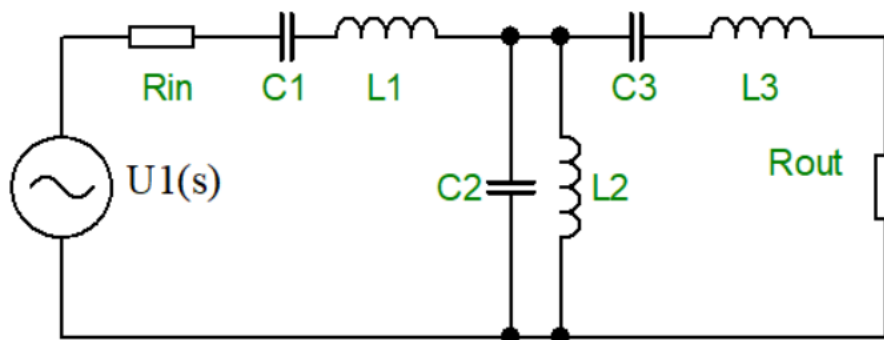
$$U_L(s) = Ls I(s) \quad (2.5)$$

$$I(s) = \frac{1}{sL} U_L(s) \quad (2.6)$$

$$Z_R(s) = Ls \quad (2.7)$$

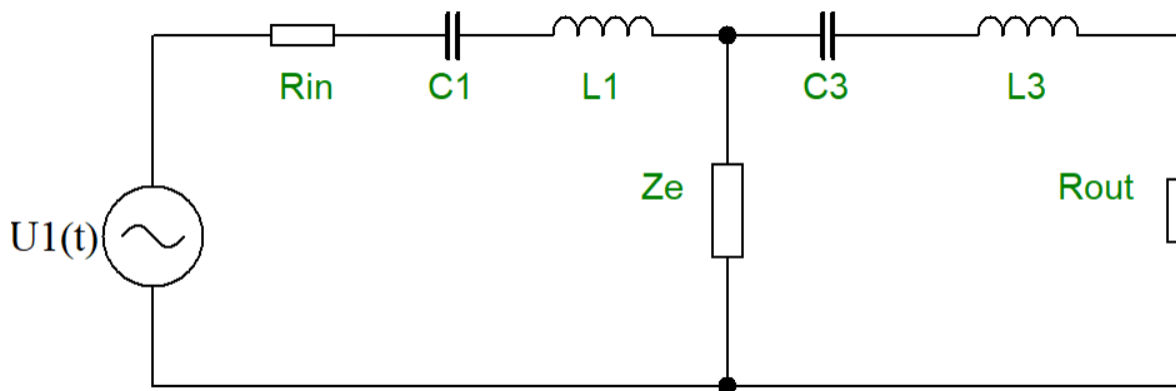
Na základe vyššie uvedených vzorcov môžeme pristúpiť k zostavovaniu diferenciálnych rovníc sústavy, aby sme potom našli funkciu prenosu. Na zostavenie diferenciálnych rovníc potrebujeme nájsť všetky prúdy a napätia na prvkoch systému. Existuje mnoho spôsobov, ako tento problém vyriešiť, ale my použijeme iba dva: Metóda slučkových prúdoov a Metóda uzlových napätí. Pri správnom riešení budú prenosové funkcie oboch spôsobov riešenia rovnaké.

Pôvodná schéma vyzerala takto:



Obr. 2.1 Elektrický obvod filtra

V prvom rade sme túto schému zjednodušili. Induktor a kondenzátor C_2 a L_2 sú v tomto prípade zapojené paralelne, takže tieto dva komponenty môžeme nahradiť jednou ekvivalentnou impedanciou Z_e :



Obr. 2.2 Elektrický obvod filtra so zjednodušenou impedanciou Z_e

V tomto prípade sa ekvivalentná impedancia zistí podľa pravidla paralelného zapojenia impedancií:

$$\frac{1}{Z_e} = \frac{1}{Z_C} + \frac{1}{Z_L} \quad (2.5)$$

$$\frac{1}{Z_e} = \frac{1}{sL_2} + \frac{1}{\frac{1}{sC_2}} \quad (2.6)$$

Po úprave dostaneme:

$$Z_e = \frac{sL_2}{1 + s^2L_2C_2} \quad (2.7)$$

2.2 Metóda slučkového prúdu

Metóda slučkového prúdu (MSP) je technika používaná na analýzu elektrických obvodov, najmä tých s viacerými slučkami alebo cestami pre tok prúdu. Táto metóda zahŕňa predpokladanie prúdov cez slučky v obvode a následné použitie Kirchhoffových zákonov na vytvorenie systému rovníc, ktoré možno vyriešiť na určenie skutočných prúdov pretekajúcich každou vetvou obvodu.

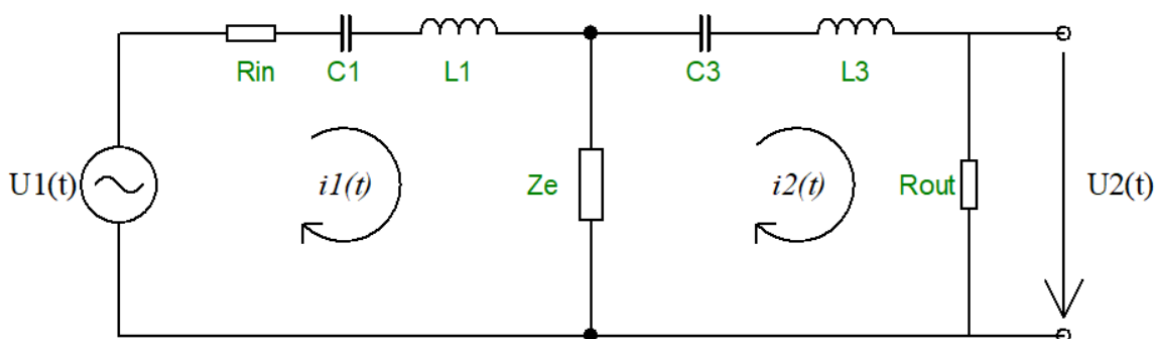
Tu sú všeobecné kroky pri použití metódy slučkového prúdu na analýzu obvodu[7]:

- 1) Identifikujte slučky: Hľadajte akékoľvek slučky alebo uzavreté cesty v obvode. Toto budú slučky, ktoré budete musieť analyzovať pomocou metódy slučkových prúdov.
- 2) Prirad'te prúdy slučky: Predpokladajme smer a veľkosť prúdu pretekajúceho každou slučkou. Prirad'te každému prúdu slučky názov premennej, napríklad I_1 , I_2 atď.

- 3) Napíšte rovnice slučky: Pomocou Kirchhoffovho zákona o napätí (KVL) napíšte rovnicu pre súčet poklesov v každej slučke. Táto rovnica bude zahŕňať prúdy slučky a impedancie a zdroje napätia v slučke.
- 4) Vyriešte systém rovníc: Teraz by ste mali mať systém rovníc, ktoré je možné vyriešiť pre slučkové prúdy. Tieto slučkové prúdy sa potom môžu použiť na výpočet prúdu cez každú vetvu obvodu.

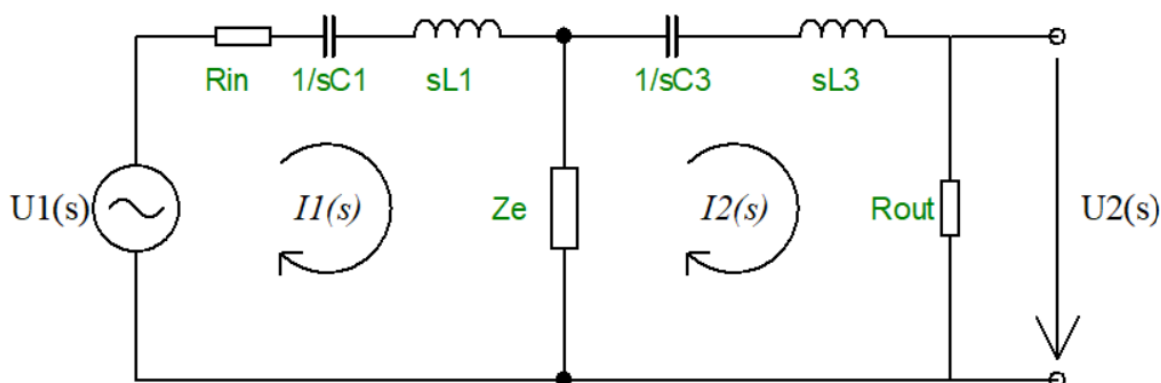
Metóda slučkového prúdu je obzvlášť užitočná na analýzu zložitých obvodov s viacerými slučkami, pretože umožňuje rozdeliť obvod na menšie, lepšie zvládnuteľné časti. Môže sa použiť aj v kombinácii s inými technikami, ako je napríklad analýza uzlov, aby sa získalo úplnejšie pochopenie správania obvodu.

Priebeh riešenia: Najprv si zvolíme smery prúdov vo vetvách



Obr. 2.3 Popis slučkových prúdov

Táto schéma je uvedená nižšie vo forme operátorov Laplace:



Obr. 2.4 Popis slučkových prúdov vo forme operátorov Laplace

Ďalej pomocou druhého Kirchhoffovho zákona napíšeme diferenciálne rovnice pre slučku 1 a pre slučku 2 v Laplaceovom tvare[5]:

$$U_1(s) = \left(Z_e + R_{in} + \frac{1}{sC_1} + sL_1 \right) I_1(s) - Z_e I_2(s) \quad (2.8)$$

$$0 = -Z_e I_1(s) - \left(Z_e + R_{out} + \frac{1}{sC_3} + sL_3 \right) I_2(s) \quad (2.9)$$

V týchto dvoch rovniciach sú neznáme prúdy $I_1(s)$ a $I_2(s)$.

Maticový zápis týchto rovníc je nasledovný:

$$\begin{bmatrix} Z_e + R_{in} + \frac{1}{sC_1} + sL_1 & -Z_e \\ -Z_e & Z_e + R_{out} + \frac{1}{sC_3} + sL_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(s) \\ I_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1(s) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Ďalej vypočítame prúd $I_2(s)$ pomocou Cramerovho pravidla:

$$I_2(s) = \frac{\det \begin{bmatrix} Z_e + R_{in} + \frac{1}{sC_1} + sL_1 & U_1(s) \\ -Z_e & 0 \end{bmatrix}}{\det \begin{bmatrix} Z_e + R_{in} + \frac{1}{sC_1} + sL_1 & -Z_e \\ -Z_e & Z_e + R_{out} + \frac{1}{sC_3} + sL_3 \end{bmatrix}} \quad (2.13)$$

$$I_2(s) = \frac{Z_e U_1(s)}{\det Z} \quad (2.13)$$

$$\det Z = \left(Z_e + R_{in} + \frac{1}{sC_1} + sL_1 \right) \left(Z_e + R_{out} + \frac{1}{sC_3} + sL_3 \right) - (Z_e)^2 \quad (2.13)$$

Keď poznáme veľkosť prúdu $I_2(s)$, môžeme nájsť veľkosť napätia $U_2(s)$ podľa Ohmovho zákona:

$$U_2(s) = R_{out} I_2(s) \quad (2.15)$$

Použijeme MATLAB a dosadíme vybrané nami hodnoty veličín na výpočty aj na vyjadrenia prenosovej funkcie

$$F(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} \quad (2.16)$$

Výpis z programu:

```
MSP
Z =
[Rin + L1*s + 1/(C1*s) + (L2*s)/(C2*L2*s^2 + 1), -
(L2*s)/(C2*L2*s^2 + 1)]
[
-(L2*s)/(C2*L2*s^2 + 1), Rout + L3*s + 1/(C3*s) +
(L2*s)/(C2*L2*s^2 + 1)]
u =
1
0
ZI2 =
[Rin + L1*s + 1/(C1*s) + (L2*s)/(C2*L2*s^2 + 1), 1]
[
-(L2*s)/(C2*L2*s^2 + 1), 0]
I2 =
(C1*C3*L2*s^3)/(C3*Rout*s + C1*Rin*s + C1*L1*s^2 + C1*L2*s^2 + C2*L2*s^2 +
C3*L2*s^2 + C3*L3*s^2 + C1*C2*L1*L2*s^4 + C1*C3*L1*L2*s^4 + C1*C3*L1*L3*s^4 +
C1*C3*L2*L3*s^4 + C2*C3*L2*L3*s^4 + C1*C3*L1*Rout*s^3 + C1*C3*L2*Rout*s^3 +
C2*C3*L2*Rout*s^3 + C1*C2*L2*Rin*s^3 + C1*C3*L2*Rin*s^3 + C1*C3*L3*Rin*s^3 +
C1*C3*Rout*Rin*s^2 + C1*C2*C3*L1*L2*L3*s^6 + C1*C2*C3*L1*L2*Rout*s^5 +
C1*C2*C3*L2*L3*Rin*s^5 + C1*C2*C3*L2*Rout*Rin*s^4 + 1)
Ur =
```

```

(C1*C3*L2*Rout*s^3)/(C3*Rout*s + C1*Rin*s + C1*L1*s^2 + C1*L2*s^2 + C2*L2*s^2 +
C3*L2*s^2 + C3*L3*s^2 + C1*C2*L1*L2*s^4 + C1*C3*L1*L2*s^4 + C1*C3*L1*L3*s^4 +
C1*C3*L2*L3*s^4 + C2*C3*L2*L3*s^4 + C1*C3*L1*Rout*s^3 + C1*C3*L2*Rout*s^3 +
C2*C3*L2*Rout*s^3 + C1*C2*L2*Rin*s^3 + C1*C3*L2*Rin*s^3 + C1*C3*L3*Rin*s^3 +
C1*C3*Rout*Rin*s^2 + C1*C2*C3*L1*L2*L3*s^6 + C1*C2*C3*L1*L2*Rout*s^5 +
C1*C2*C3*L2*L3*Rin*s^5 + C1*C2*C3*L2*Rout*Rin*s^4 + 1)
F =
(C1*C3*L2*Rout*s^3)/(C3*Rout*s + C1*Rin*s + C1*L1*s^2 + C1*L2*s^2 + C2*L2*s^2 +
C3*L2*s^2 + C3*L3*s^2 + C1*C2*L1*L2*s^4 + C1*C3*L1*L2*s^4 + C1*C3*L1*L3*s^4 +
C1*C3*L2*L3*s^4 + C2*C3*L2*L3*s^4 + C1*C3*L1*Rout*s^3 + C1*C3*L2*Rout*s^3 +
C2*C3*L2*Rout*s^3 + C1*C2*L2*Rin*s^3 + C1*C3*L2*Rin*s^3 + C1*C3*L3*Rin*s^3 +
C1*C3*Rout*Rin*s^2 + C1*C2*C3*L1*L2*L3*s^6 + C1*C2*C3*L1*L2*Rout*s^5 +
C1*C2*C3*L2*L3*Rin*s^5 + C1*C2*C3*L2*Rout*Rin*s^4 + 1)
F =
(C1*C3*L2*Rout*s^3)/(C1*C2*C3*L1*L2*L3*s^6 + (C1*C2*C3*L1*L2*Rout +
C1*C2*C3*L2*L3*Rin)*s^5 + (C1*C2*L1*L2 + C1*C3*L1*L2 + C1*C3*L1*L3 + C1*C3*L2*L3 +
C2*C3*L2*L3 + C1*C2*C3*L2*Rout*Rin)*s^4 + (C1*C3*L1*Rout + C1*C3*L2*Rout +
C2*C3*L2*Rout + C1*C2*L2*Rin + C1*C3*L2*Rin + C1*C3*L3*Rin)*s^3 + (C1*L1 + C1*L2 +
C2*L2 + C3*L2 + C3*L3 + C1*C3*Rout*Rin)*s^2 + (C3*Rout + C1*Rin)*s + 1)
((C1 C3 L2 Rout) s^3)/(C1 C2 C3 L1 L2 L3 s^6 + (C1 C2 C3 L1 L2 Rout + C1 C2 C3 L2 L3
Rin) s^5 + (C1 C2 L1 L2 + C1 C3 L1 L2 + C1 C3 L1 L3 + C1 C3 L2 L3 + C2 C3 L2 L3 + C1
C2 C3 L2 Rout Rin) s^4 + (C1 C3 L1 Rout + C1 C3 L2 Rout + C2 C3 L2 Rout + C1 C2 L2 Rin + C1 C3 L2
Rin + C1 C3 L3 Rin) s^3 + (C1 L1 + C1 L2 + C2 L2 + C3 L2 + C3 L3 + C1 C3 Rout Rin) s^2 + (C3 Rout + C1
Rin) s + 1)

cit =
C1*C3*L2*Rout*s^3
men =
C3*Rout*s + C1*Rin*s + C1*L1*s^2 + C1*L2*s^2 + C2*L2*s^2 + C3*L2*s^2 + C3*L3*s^2 +
C1*C2*L1*L2*s^4 + C1*C3*L1*L2*s^4 + C1*C3*L1*L3*s^4 + C1*C3*L2*L3*s^4 +
C2*C3*L2*L3*s^4 + C1*C3*L1*Rout*s^3 + C1*C3*L2*Rout*s^3 + C2*C3*L2*Rout*s^3 +
C1*C2*L2*Rin*s^3 + C1*C3*L2*Rin*s^3 + C1*C3*L3*Rin*s^3 + C1*C3*Rout*Rin*s^2 +
C1*C2*C3*L1*L2*L3*s^6 + C1*C2*C3*L1*L2*Rout*s^5 + C1*C2*C3*L2*L3*Rin*s^5 +
C1*C2*C3*L2*Rout*Rin*s^4 + 1
b =
1.0e-25 *
0.3233      0      0      0
a =
0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      1.0000
b =
1.0e-25 *
0.3233      0      0      0
a =
0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      1.0000

F =
3.233e-26 s^3
-----
6.657e-44 s^6+6.245e-38 s^5+4.943e-29 s^4+3.088e-23 s^3+1.22e-14 s^2+3.802e-09 s+1

Continuous-time transfer function.

F =
3.233e-26 s^3
-----
6.657e-44 s^6 + 6.245e-38 s^5 + 4.943e-29 s^4 + 3.088e-23 s^3 + 1.22e-14 s^2 +
3.802e-09 s + 1

```

Prenosová funkcia má tvar:

$$F = \frac{c_0 s^3}{a_0 s^6 + a_1 s^5 + a_2 s^4 + a_3 s^3 + a_4 s^2 + a_5 s + a_6} \quad (2.17)$$

kde :

$$c_0 = C_1 C_3 L_2 R_l$$

$$a_0 = C_1 C_2 C_3 L_1 L_2 L_3$$

$$a_1 = C_1 C_2 C_3 L_1 L_2 R_l + C_1 C_2 C_3 L_2 L_3 R_{in}$$

$$a_2 = C_1 C_2 L_2 L_1 + C_1 C_3 L_2 L_1 + C_1 C_3 L_3 L_1 + C_1 C_3 L_2 L_3 + C_3 C_2 L_2 L_3 + C_1 C_2 C_3 L_2 R_{in} R_l$$

$$a_3 = C_1 C_3 L_1 R_l + C_1 C_3 L_1 R_l + C_2 C_3 L_2 R_l + C_1 C_2 L_2 R_{in} + C_1 C_3 R_{in} L_2 + C_1 C_3 R_{in} L_3$$

$$a_4 = C_1 L_1 + C_1 L_2 + L_2 C_2 + C_3 L_2 + C_3 L_3 + C_1 C_3 R_{in} R_l$$

$$a_5 = C_3 R_l + C_1 R_{in}$$

$$a_6 = k$$

Nuly a póly:

Nuly	Póly . 10^{-7}
0	-0.0123 + 1.6433i
0	-0.0123 - 1.6433i
0	-0.0235 + 1.5706i
-	-0.0235 - 1.5706i
-	-0.0112 + 1.5014i
-	-0.0112 - 1.5014i

Tab. 2.1 Nuly a poly prenosu

2.3 Metóda uzlového napätia

Metóda uzlového napätia (MUN) je technika používaná na analýzu elektrických obvodov, najmä tých s viacerými uzlami alebo bodmi, kde sa stretáva viac prvkov obvodu. Táto metóda zahŕňa priradenie premennej napätia ku každému uzlu v obvode a následné použitie Kirchhoffovho súčasného zákona (KCL) na vytvorenie systému rovníc, ktoré možno vyriešiť na určenie napätia v každom uzle.

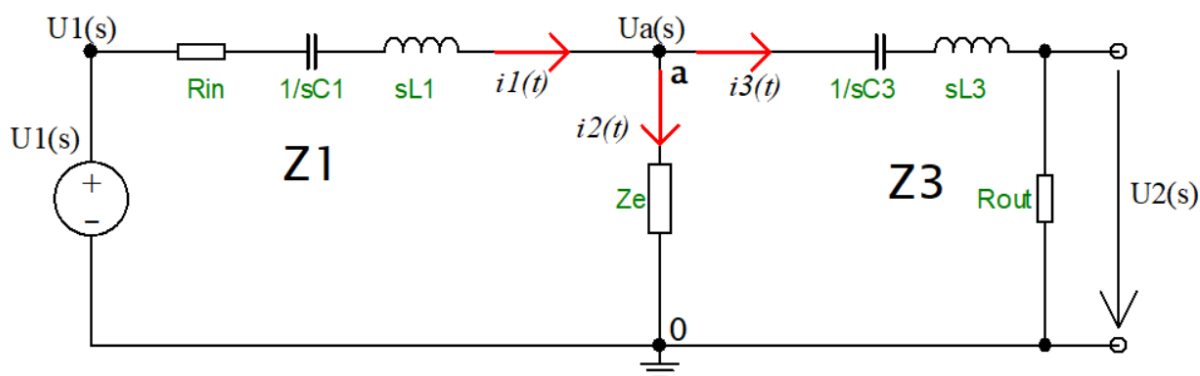
Tu sú všeobecné kroky, ktoré sa týkajú použitia metódy napätia uzla na analýzu obvodu[6]:

- 1) Identifikujte uzly: Hľadajte akékoľvek body v obvode, kde sa stretávajú tri alebo viac prvkov obvodu. Toto budú uzly, ktoré budete musieť analyzovať pomocou metódy napätia uzla.
- 2) Priradte napätia uzla: Predpokladajme referenčný uzol (zvyčajne ten, ktorý má najviac spojení) a priradte premennú napätia ku každému zo zostávajúcich uzlov v obvode vzhľadom na referenčný uzol.
- 3) Napíšte rovnice KCL: Pomocou Kirchhoffovho súčasného zákona (KCL) napíšte rovnicu pre súčet prúdov vstupujúcich alebo vychádzajúcich z každého uzla. Táto rovnica bude zahŕňať napätia uzla a odpory a zdroje prúdu pripojené k uzlu.

- 4) Vyriešte systém rovníc: Teraz by ste mali mať systém rovníc, ktoré možno vyriešiť pre napätia v uzloch. Tieto napätia uzlov sa potom môžu použiť na výpočet prúdu cez každú vetvu obvodu.

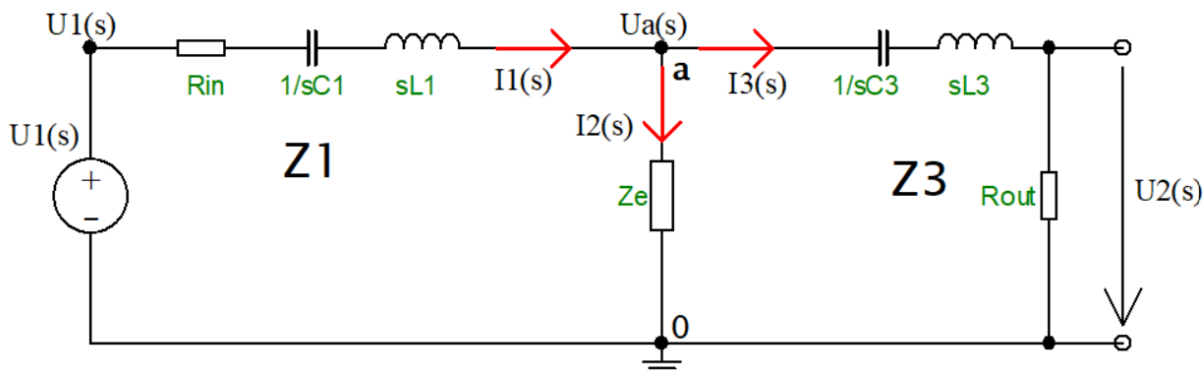
Metóda napätia uzla môže byť obzvlášť užitočná na analýzu zložitých obvodov s viacerými uzlami, pretože vám umožňuje rozdeliť obvod na menšie, lepšie zvládnuteľné časti. Môže sa použiť aj v kombinácii s inými technikami, ako je metóda slučkového prúdu, aby sa získalo úplnejšie pochopenie správania obvodu.

V našom obvode sú iba dva uzly, z ktorých jeden bude s napätím (a) a druhý s nulovým potenciálom (zem). Pre uzol s napätím vypíšeme aj uzlové prúdy:



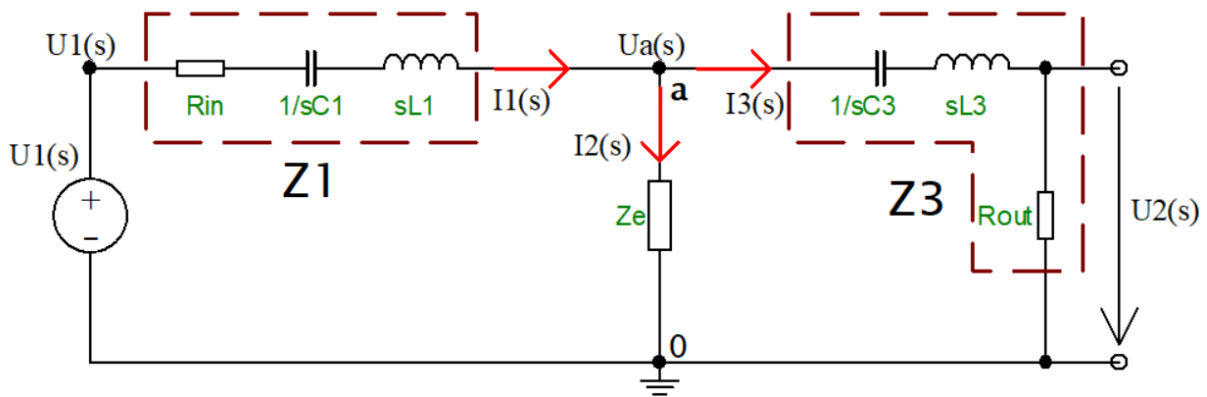
Obr. 2.5 Popis prúdov v uzle A

Táto schéma je uvedená nižšie zápise pomocou Laplaceových operátorov:



Obr. 2.6 Popis prúdov v uzle A pomocou Laplaceových operátorov

Pre zjednodušenie výpočtov budú komplexné odpory dvoch vetiev zvýraznených bodkovanou čiarou podmienené označené impedanciami Z_1 a Z_2 :



Obr. 2.7 Elektrický obvod so zjednodušenými impedanciami

Tieto impedancie vypočítame podľa pravidla sériového zapojenia odporov:

$$Z_1 = R_{in} + sL_1 + \frac{1}{sC_1} \quad (2.5)$$

$$Z_3 = R_{out} + sL_3 + \frac{1}{sC_3} \quad (2.6)$$

Po uprave dostaneme:

$$Z_1 = \frac{s^2 L_1 C_1 + s R_{in} C_1 + 1}{s C_1} \quad (2.7)$$

$$Z_3 = \frac{s^2 L_3 C_3 + s R_{out} C_3 + 1}{s C_3}$$

Zoberme si uzol A. Zapišme si preň prvý Kirchhoffov zákon:

$$I_1(s) - I_2(s) - I_3(s) = 0 \quad (2.15)$$

Nech je napätie v uzle A rovné $U_a(s)$. Každý prúd rovnice zapišme podľa Ohmovho zákona ($I = \frac{U}{R}$):

$$\frac{U_1(s) - U_a(s)}{Z_1} - \frac{U_a(s)}{Z_e} - \frac{U_a(s)}{Z_3} = 0 \quad (2.16)$$

$$U_a(s) \left[\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_e} + \frac{1}{Z_3} \right] = \frac{U_1(s)}{Z_1} \quad (2.1)$$

$$U_a(s) = \frac{U_1(s) Z_e Z_3}{Z_e Z_3 + Z_1 Z_3 + Z_e Z_1} \quad (2.1)$$

$$U_2(s) = R_{out} I_3(s) \quad (2.1)$$

$$I_3(s) = \frac{U_a(s)}{Z_3} \quad (2.1)$$

Po dosadení:

$$U_2(s) = \frac{U_a(s) R_{out}}{Z_3} \quad (2.1)$$

$$U_2(s) = \frac{U_1(s) Z_e Z_3}{Z_e Z_3 + Z_1 Z_3 + Z_e Z_1} * \frac{R_{out}}{Z_3} \quad (2.1)$$

Prechodovú funkciu budeme hľadať pomocou vzorca $F(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)}$. Do tohto vzorca dosadíme $U_2(s)$. V tomto prípade sa $U_1(s)$ vzájomne zruší a dostaneme výsledný vzorec:

$$F = \frac{Z_e R_{out}}{Z_e Z_3 + Z_1 Z_3 + Z_e Z_1} \quad (2.1)$$

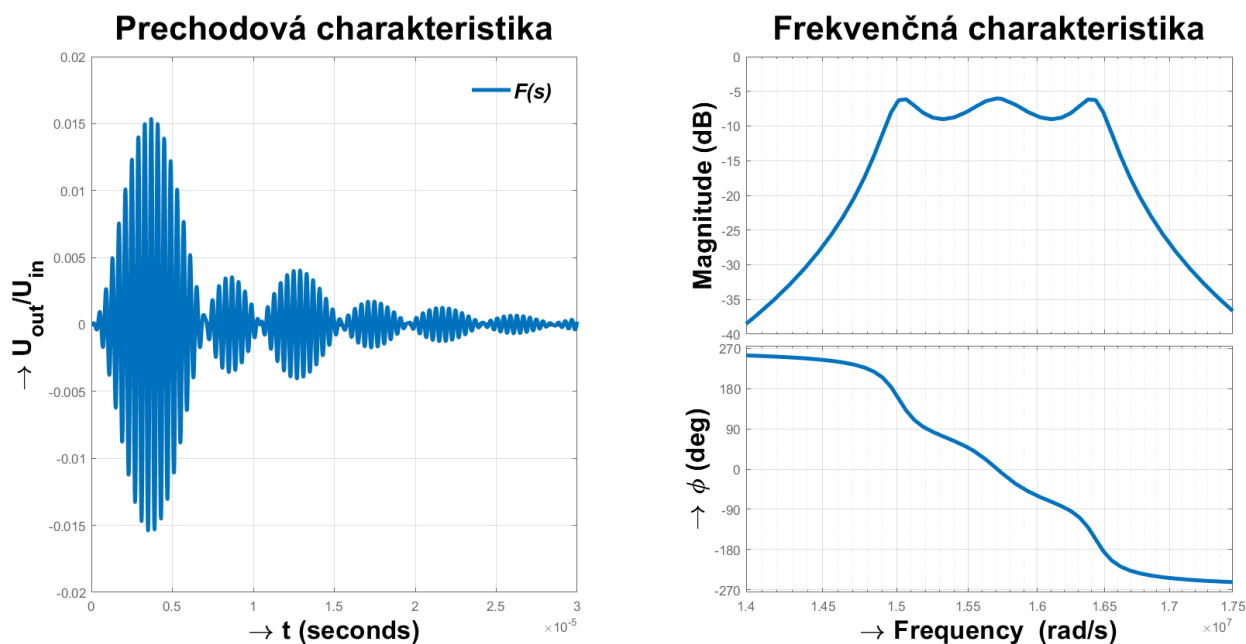
Pomocou MATLABu sme vypočítali impedancie a následne sme vypočítali aj samotnú prechodovú funkciu. V dôsledku toho sme dostali nasledujúci výpis z programu:

```
MUN
Ze =
(L2*s)/(C2*L2*s^2 + 1)
Z1 =
(C1*L1*s^2 + C1*Rin*s + 1)/(C1*s)
Z3 =
(C3*L3*s^2 + C3*Rout*s + 1)/(C3*s)
F =
(C1*C3*L2*Rout*s^3)/(C1*C2*C3*L1*L2*L3*s^6 + (C1*C2*C3*L1*L2*Rout +
C1*C2*C3*L2*L3*Rin)*s^5 + (C1*C2*L1*L2 + C1*C3*L1*L2 + C1*C3*L1*L3 + C1*C3*L2*L3 +
C2*C3*L2*L3 + C1*C2*C3*L2*Rout*Rin)*s^4 + (C1*C3*L1*Rout + C1*C3*L2*Rout +
C2*C3*L2*Rout + C1*C2*L2*Rin + C1*C3*L2*Rin + C1*C3*L3*Rin)*s^3 + (C1*L1 + C1*L2 +
C2*L2 + C3*L2 + C3*L3 + C1*C3*Rout*Rin)*s^2 + (C3*Rout + C1*Rin)*s + 1)
((C1 C3 L2 Rout) s^3)/(C1 C2 C3 L1 L2 L3 s^6 + (C1 C2 C3 L1 L2 Rout + C1 C2 C3 L2 L3
Rin)
s^5 + (C1 C2 L1 L2 + C1 C3 L1 L2 + C1 C3 L1 L3 + C1 C3 L2 L3 + C2 C3 L2 L3 + C1
C2 C3 L2 Rout Rin)
s^4 + (C1 C3 L1 Rout + C1 C3 L2 Rout + C2 C3 L2 Rout + C1 C2 L2 Rin + C1 C3 L2
Rin + C1 C3 L3 Rin)
s^3 + (C1 L1 + C1 L2 + C2 L2 + C3 L2 + C3 L3 + C1 C3 Rout Rin) s^2 + (C3 Rout + C1
Rin) s + 1)
cit =
C1*C3*L2*Rout*s^3
men =
C3*Rout*s + C1*Rin*s + C1*L1*s^2 + C1*L2*s^2 + C2*L2*s^2 + C3*L2*s^2 + C3*L3*s^2 +
C1*C2*L1*L2*s^4 + C1*C3*L1*L2*s^4 + C1*C3*L1*L3*s^4 + C1*C3*L2*L3*s^4 +
C2*C3*L2*L3*s^4 + C1*C3*L1*Rout*s^3 + C1*C3*L2*Rout*s^3 + C2*C3*L2*Rout*s^3 +
C1*C2*L2*Rin*s^3 + C1*C3*L2*Rin*s^3 + C1*C3*L3*Rin*s^3 + C1*C3*Rout*Rin*s^2 +
C1*C2*C3*L1*L2*L3*s^6 + C1*C2*C3*L1*L2*Rout*s^5 + C1*C2*C3*L2*L3*Rin*s^5 +
C1*C2*C3*L2*Rout*Rin*s^4 + 1
b =
1.0e-25 *
0.3233      0      0      0
a =
0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      1.0000
b =
1.0e-25 *
0.3233      0      0      0
a =
0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      1.0000
```

F =

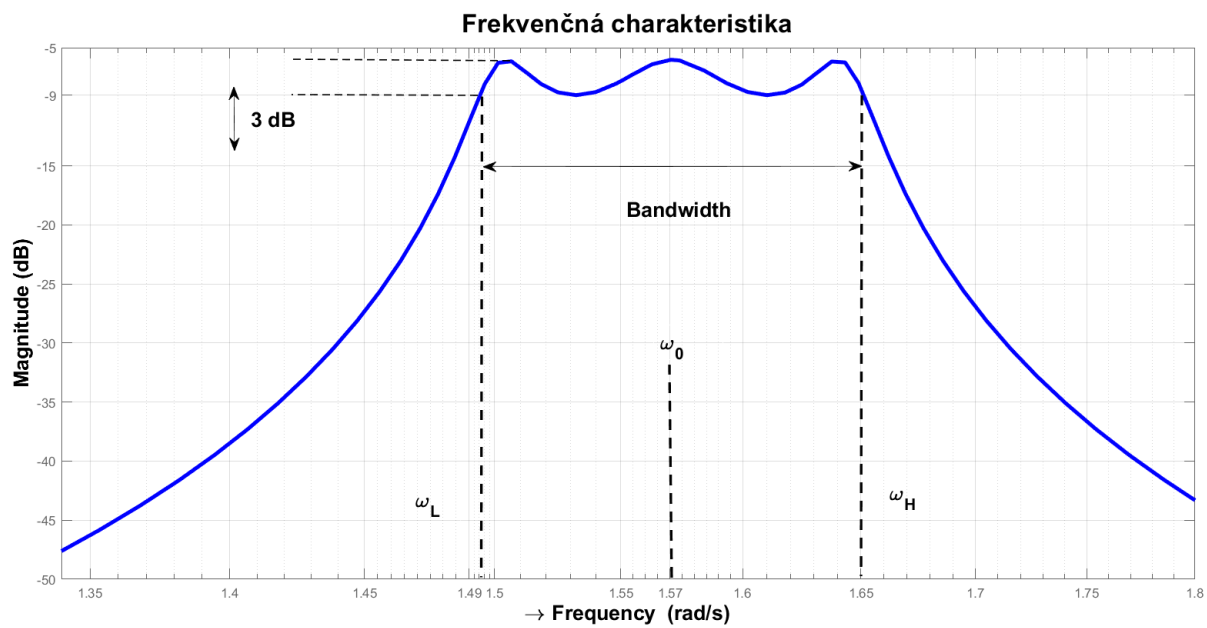
$$\frac{3.233e-26 \text{ s}^3}{6.657e-44s^6+6.245e-38s^5+4.943e-29s^4+3.088e-23s^3+1.22e-14s^2+3.802e-09s+1}$$

Po výpočtoch v MATLABe sme dostali rovnakú prechodovú funkciu ako pri výpočte metódou MSP. To potvrdzuje správnosť našich výpočtov. Za predpokladu, že náš matematický model je správny, môžeme pristúpiť k ďalším bodom analýzy nášho systému.



Obr. 2.8 Prechodová charakteristika a logaritmické frekvenčné charakteristiky

Z prechodovej a frekvenčných-logaritmických charakteristík vidíme, že elektrický systém, ktorý analyzujeme, je filter typu - pásmový priepust. Pozrime sa podrobnejšie na frekvenčnú charakteristiku. Vidíme, že frekvenčné pásmo, cez ktoré môže signál prejsť, je pomerne malé, čo sa vypočíta podľa vzorcov $\Delta = \frac{\omega_H - \omega_L}{\omega_0}$ a $BW = \Delta \cdot \omega_0$ ($\omega = 2\pi f$). Kde ω_0 – frekvencia stredu, ω_H – horná frekvencia priepustného pásma, ω_L – dolná frekvencia priepustného pásma. Prechod zo zádržnej zóny do pásma priepustu a naopak je dosť strmý. Vzhľadom na to, že parametre obvodu L_1, C_1 a L_3, C_3 sú rovnaké, pásmo priepustu je symetrickým vzhľadom na ω_0 . V priepustnom pásme vidíme tri vrcholy s amplitúdou 3 dB vzhľadom na hladší povrch v priepustnom pásme. Z všetkých týchto znakov vidíme, že ide o Chebyshev filter typu 1 a 3 radu (rad závisí od počtu L-C spojení v obvode). Z teoretických znalostí tohto filtra vieme vypočítať parametre obvodu tak, aby mal frekvenčnú charakteristiku akú potrebujeme.

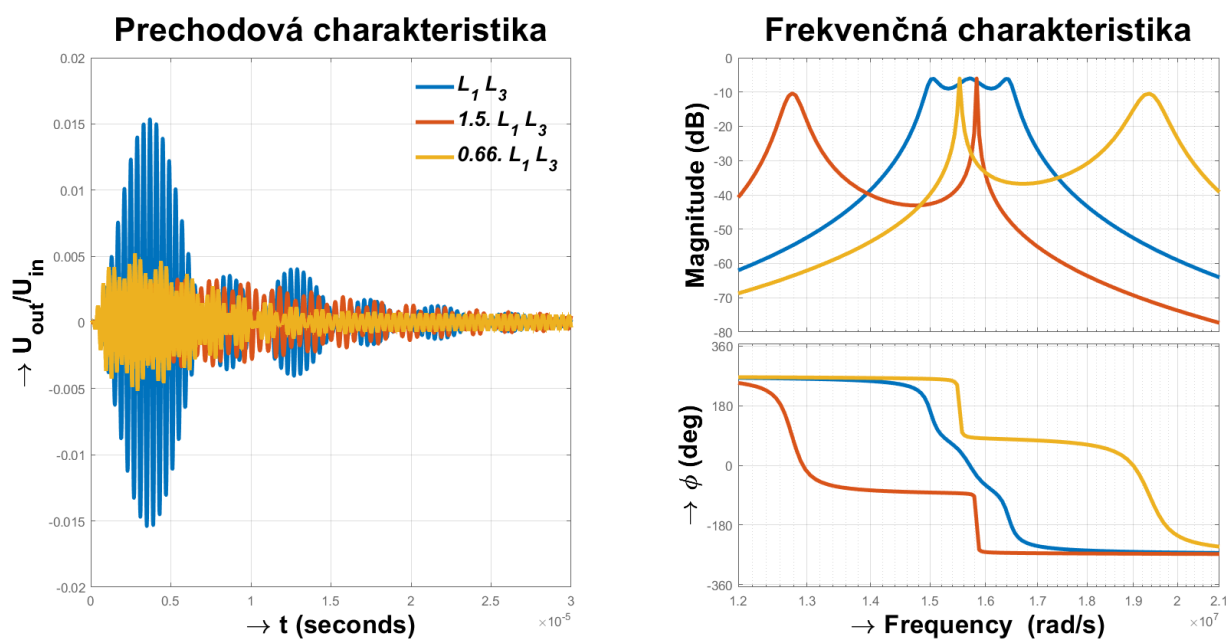


Obr. 2.9 Vlastnosti LFCh

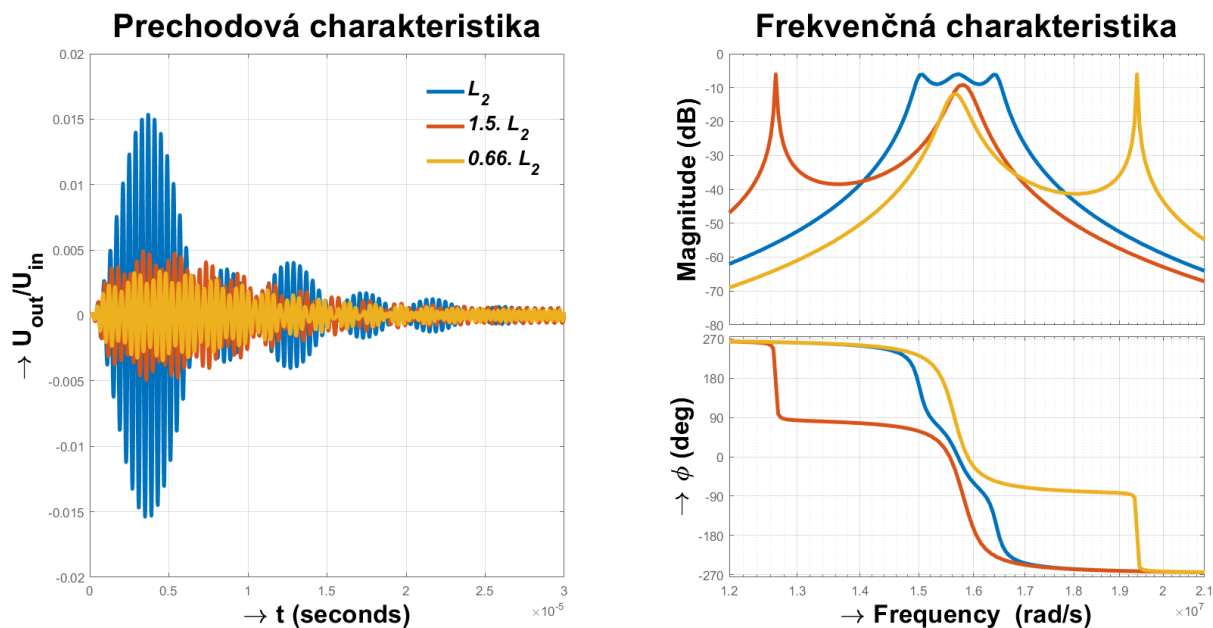
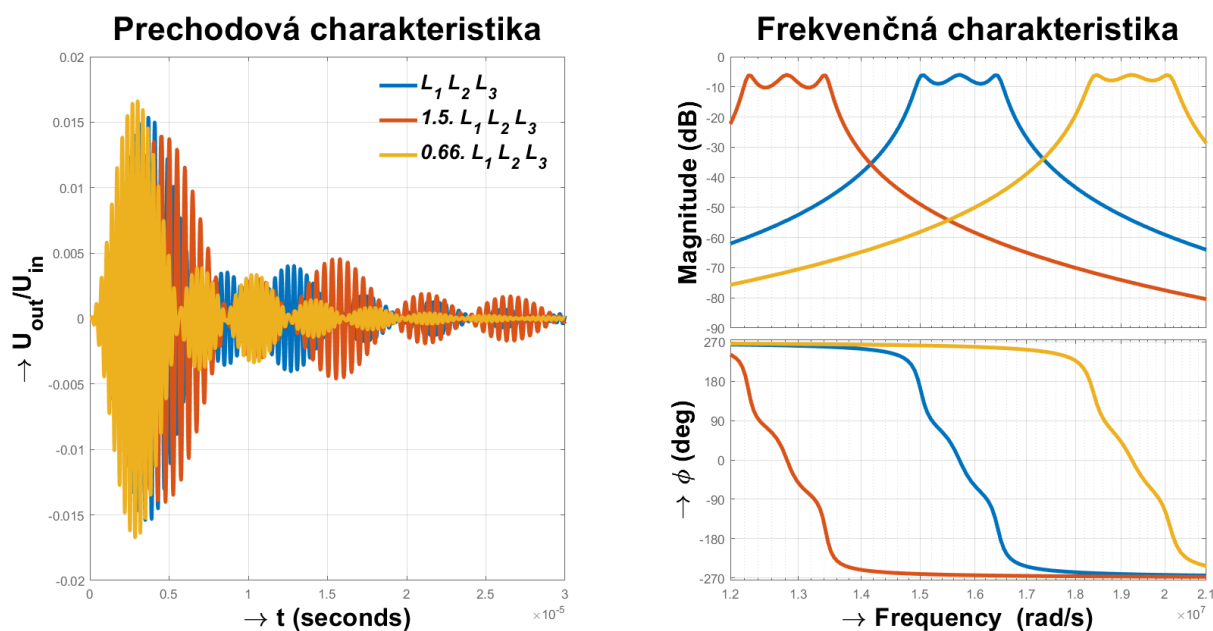
3 Zmena parametrov dynamického systému

V tejto časti budeme analyzovať vplyv parametrov elektrického obvodu, ako je indukčnosť, kapacita a odpor. Zmenou parametrov a porovnaním charakteristík bude efekt parametra pozorovateľný. Základné parametre obvodu: $R_{in} = 50 \Omega$, $R_{out} = 50 \Omega$, $L_1 = 106,59 \mu\text{H}$, $L_2 = 0,447 \mu\text{H}$, $L_3 = 106,59 \mu\text{H}$, $C_1 = 38 \text{ pF}$, $C_2 = 9,06 \text{ nF}$, $C_3 = 38 \text{ pF}$.

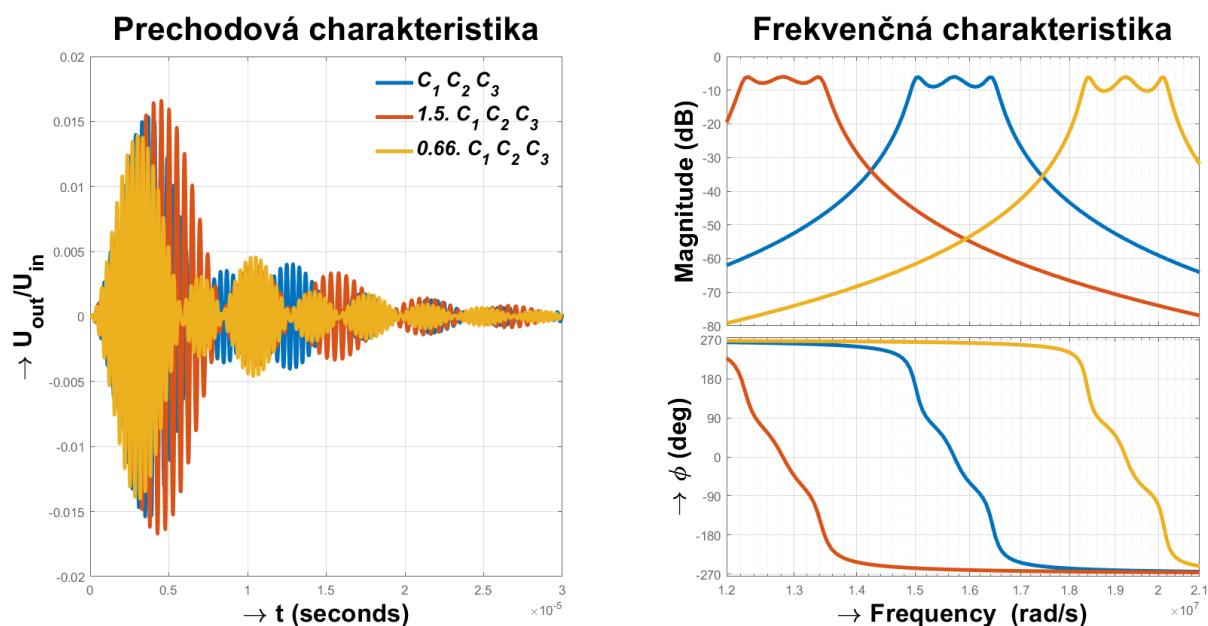
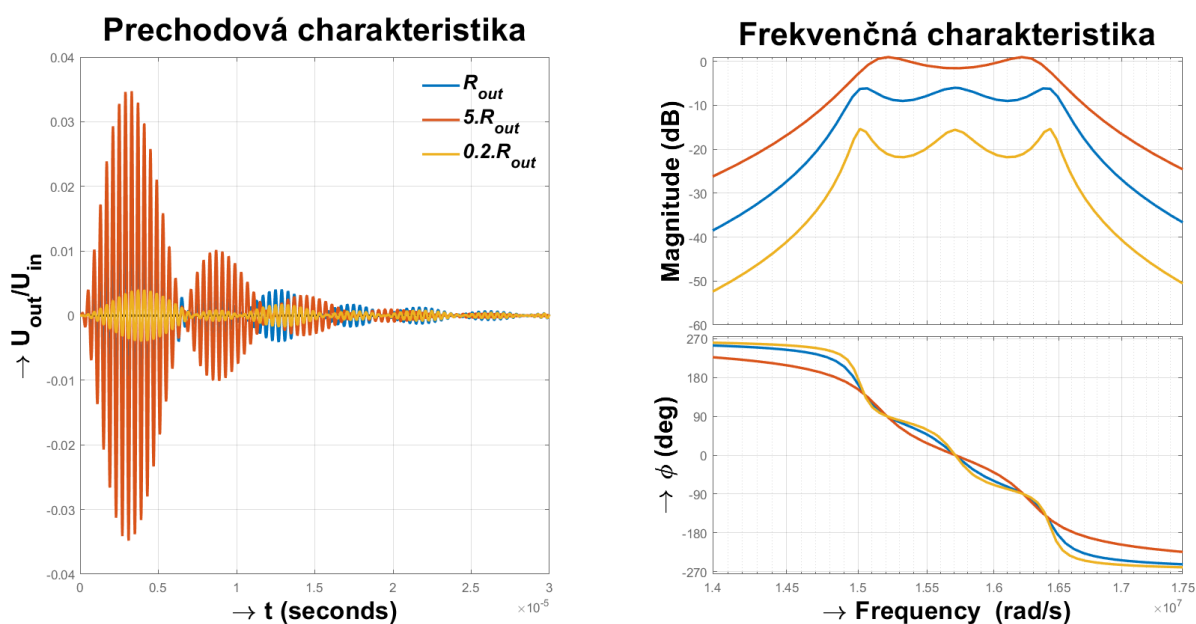
Parametre budeme zvyšovať a znižovať o rovnakú hodnotu. Prvý parameter, ktorú zmeníme, je L_1 a indukčnosť L_3 . Berieme naraz zmenu oboch indukčností, pretože v štandardnej forme nášho systému sú rovnaké, v dôsledku čoho má priepustné pásmo symetrický tvar. Z charakteristík na Obr.3.1 vidíme, že táto zmena parametrov privedie k posunu priepustného pásma aj jeho výraznému zvlneniu. Podobnú situáciu môžeme vidieť, ak zmeníme parameter L_2 , Obr.3.2. Ale tvar pasiem je akoby zrkadlový vo vzťahu k charakteristikám, kde sme zmenili L_1 a L_2 . Na Obr.3.3 sme zmenili všetky indukčnosti v obvode o rovnakú hodnotu. V dôsledku toho môžeme vidieť, že zosilnenie na prechodovej charakteristike klesá a čas ustálenia zvyšovaním indukčnosti sa zväčšuje. Na logaritmickej frekvenčnej charakteristike vidíme, že zmenou indukčnosti sa mení poloha priepustného pásma, pričom šírka priepustu a amplitúda sú zachované. Zmenou indukčnosti sa zväčší zvlnenie v priepustnom pásme keď sa indukčnosť zniží, pásmo sa vyhladí.



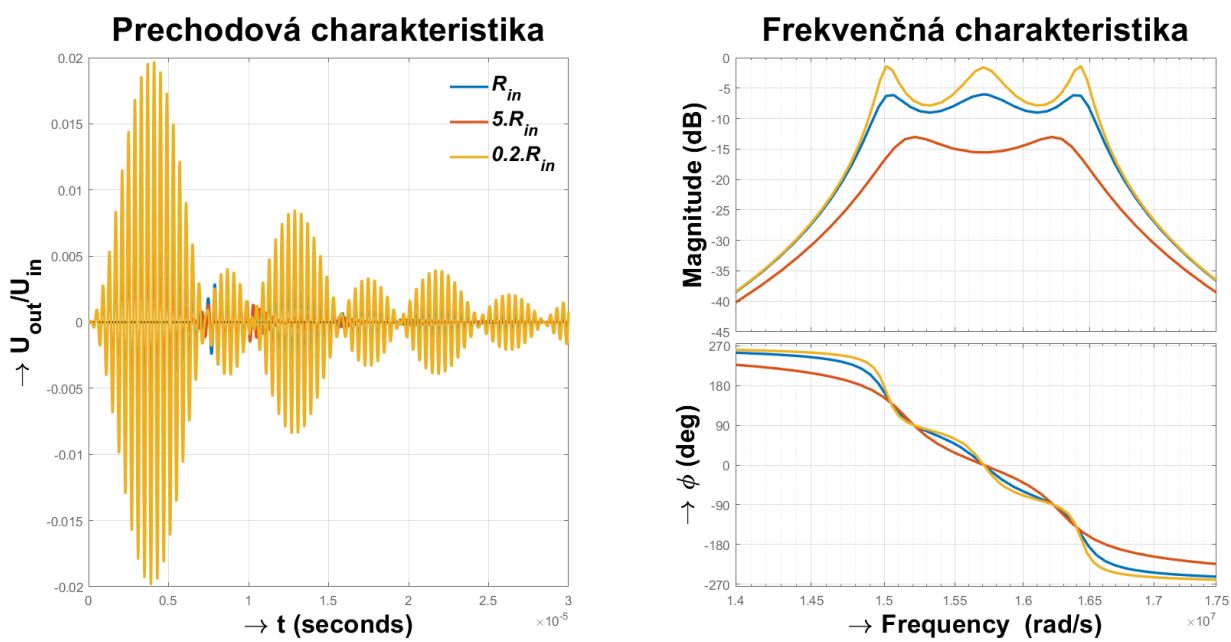
Obr. 3.1.1 Priebehy PrCh a LFCh pri zmene parametrov L_1 a L_3

Obr. 3.2 Priebehy PrCh a LFCh pri zmene parametra L_2 Obr. 3.3 Priebehy PrCh a LFCh pri zmene parametrov L_1 , L_2 a L_3

Pri analýze zmeny kapacity pre náš systém zmeníme všetky hodnoty na kondenzátoroch o rovnakú hodnotu, rovnako, ako pri cievkach, pretože zmena jednotlivých kapacít privedie k podobným výsledkom ako zmena jednotlivých indukčností. Na Obr.3.4 môžeme vidieť, že zosilnenie prechodovej charakteristiky sa zvyšuje so zvyšujúcimi sa hodnotami kapacity. Na frekvenčnej charakteristike vidíme posun priepustných pásiem na logaritmickú priamku so zachovaním amplitúdy a šírky pásma. Keď sa kapacita zvyšuje, frekvencia centru na logaritmickú priamku sa znižuje a pásmo sa stáva hladším, zníži sa zvlnenie.

Obr. 3.4 Priebehy PrCh a LFCh pri zmene parametrov C_1 , C_2 a C_3 Obr. 3.5 Priebehy PrCh a LFCh pri zmene parametra R_{out}

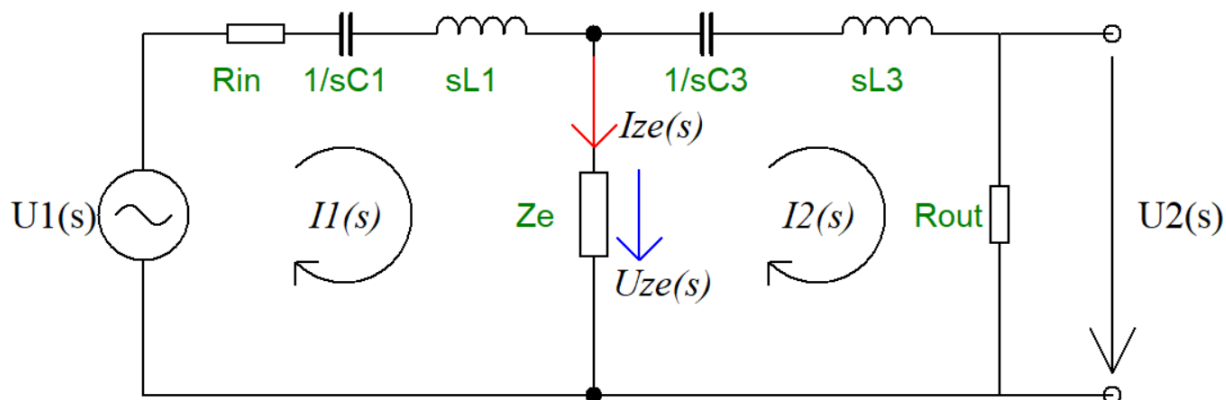
Analyzujeme zmenu odporu R_{in} a R_{out} , Obr.3.5-6. Keď sa odpor R_{out} zvýši, zosilnenie prechodovej charakteristiky sa zvýši, na rozdiel od zvýšenia odporu R_{in} , kde je naopak. Na frekvenčnej charakteristike vidíme, že zvýšenie odporu R_{out} privedie k zvýšeniu amplitúdy priepustného pásma a k vyhladeniu pásma. Keď sa odpor R_{in} zvýši, amplitúda pásma sa zníži a tiež sa vyhladí.

Obr. 3.6 Priebehy PrCh a LFCh pri zmene parametra R_{in}

4 Model v Simulinku

Pomocou diferenciálnych rovníc, ktoré sme zostavili vyššie, môžeme zostaviť simulačný model, ktorý môžeme simulovať v programe Simulink. Tento model bude prezentovaný vo forme blokovej schémy. Výhodou simulačného modelu je pomerne ľahko vnímateľný tvar, možnosť vyčleniť určité prvky systému, sledovať priebeh vstupných a výstupných hodnôt ako aj priebeh jednotlivých signálov v strede systému. Keďže vychádzame z rovnakých diferenciálnych rovníc, môžeme sledovať priebeh prenosovej funkcie na výstupe.

Skladanie blokového diagramu začína od konca. Naša bloková schéma sa bude skladať z troch častí, preto vyjadrieme naše výstupné hodnoty z našich diferenciálnych rovníc na základe I a II Kirchhoffovho zákonov tak, že pri zostavovaní diagramu použijeme iba integračné, násobiace, sčítacie a odčítacie operácie.



Obr. 4.1 Elektrický obvod filtra

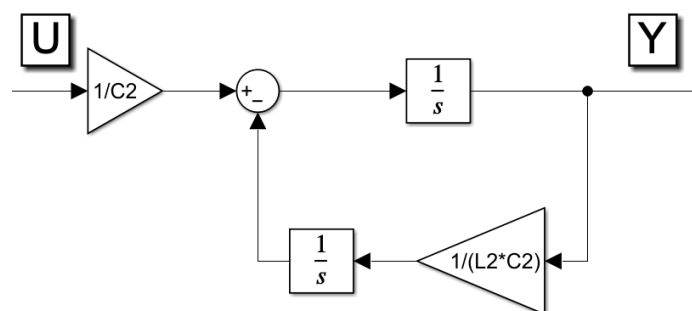
Výpočet zjednodušenej impedancie v blokovej schéme:

$$Z_e = \frac{L_2 s}{1 + L_2 C_2 s^2} = \frac{Y}{U} \quad (4.1)$$

Z čoho vyplýva:

$$Y = \frac{1}{s} \left(\frac{U}{C_2} - \frac{Y}{s L_2 C_2} \right) \quad (4.2)$$

Bloková schéma:



Obr. 4.2 Simulačná schéma podsystemu s paralelnou LC impedanciou Z_e

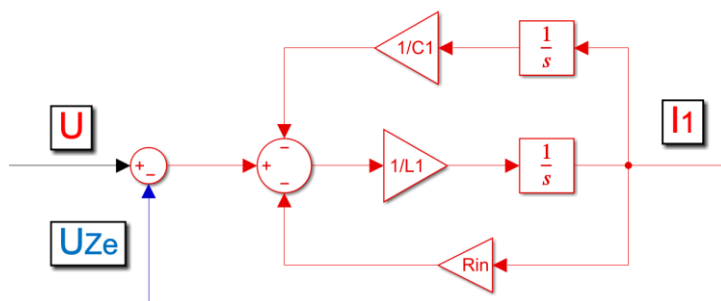
Rovnica pre **prvú slučku**:

$$U_i(s) = \left(R_{in} + \frac{1}{C_1 s} + L_1 s \right) I_1(s) + U_{Ze} \quad (4.3)$$

Z čoho vyplýva:

$$I_1(s) = \frac{U(s) - U_{Ze}(s)}{R_{in} + L_1 s + \frac{1}{C_1 s}} \quad (4.4)$$

Dielčia schéma:



Obr. 4.3 Simulačná schéma pre prvú slučku

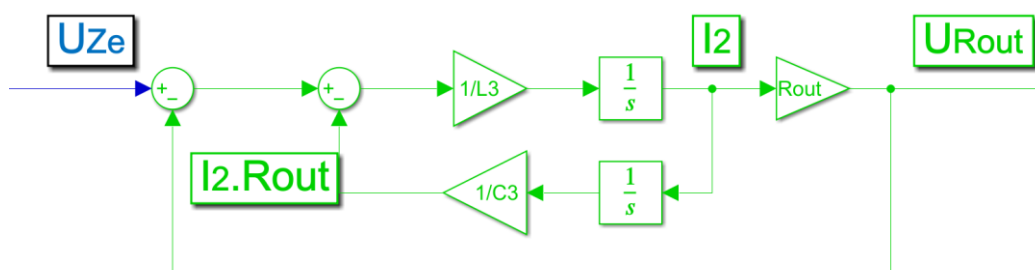
Rovnica pre **druhú slučku**:

$$U_{Ze}(s) = \left(R_{out} + \frac{1}{C_3 s} + L_3 s \right) I_2(s) \quad (4.5)$$

Z čoho vyplýva:

$$I_2(s) = \frac{U_{Ze}(s) - R_{out} I_2(s)}{L_3 s + \frac{1}{C_3 s}} \quad (4.6)$$

Dielča schema:



Obr. 4.4 Simulačná schéma pre prvú slučku

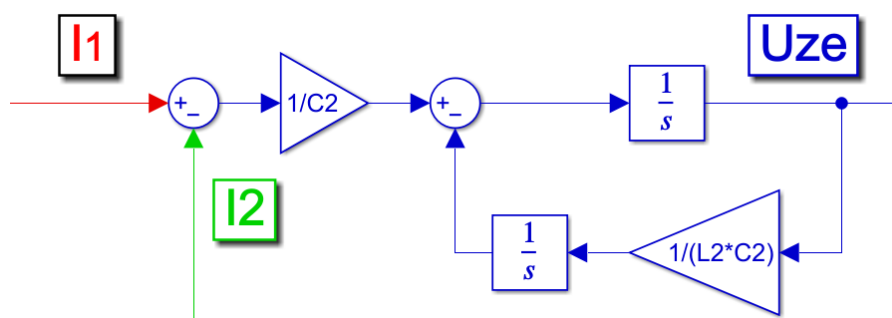
Rovnica pre **uzol A**:

$$I_{ze}(s) = I_1(s) - I_2(s) = \frac{U_{ze}}{Z_e} \quad (4.7)$$

Z čoho vyplýva:

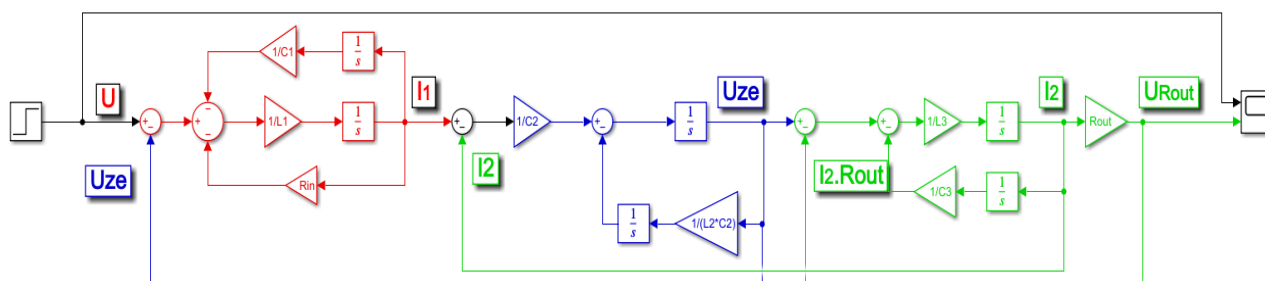
$$U_{ze}(s) = (I_1(s) - I_2(s))Z_e \quad (4.8)$$

Dielčia schéma:

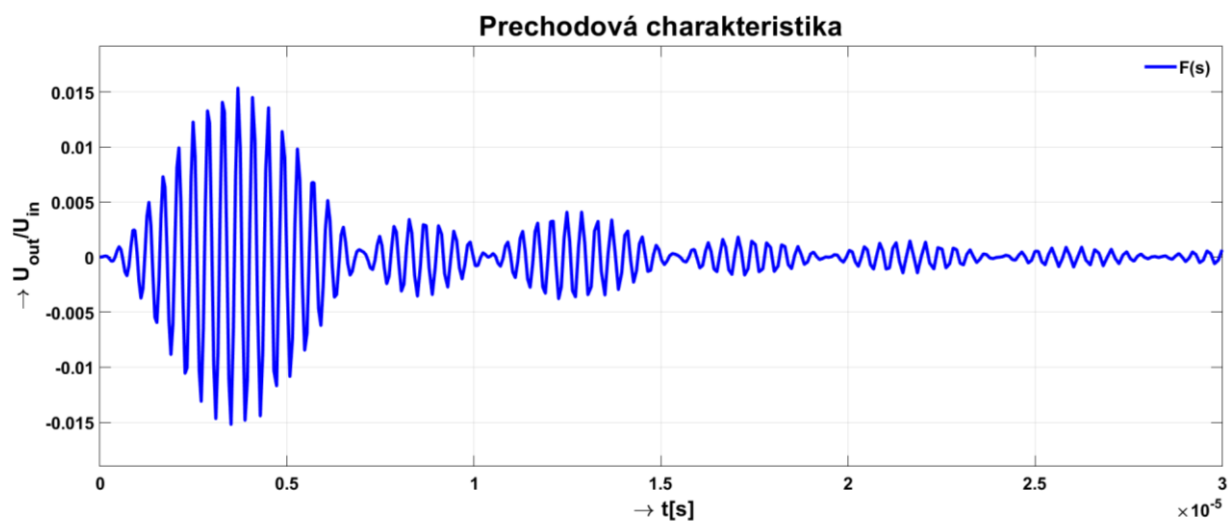


Obr. 4.5 Simulačná schéma pre uzol A

Finálna bloková schéma:



Obr. 4.6 Finálna simulačná schéma v Simulink



Obr. 4.7 PrCh zo schémy v Simulink

Priebeh ma rovnaký tvar ako na Obr.2.5, kde sme modelovali pomocou prenosovej funkcie. To znamená, že náš model v Simulinku je správny.

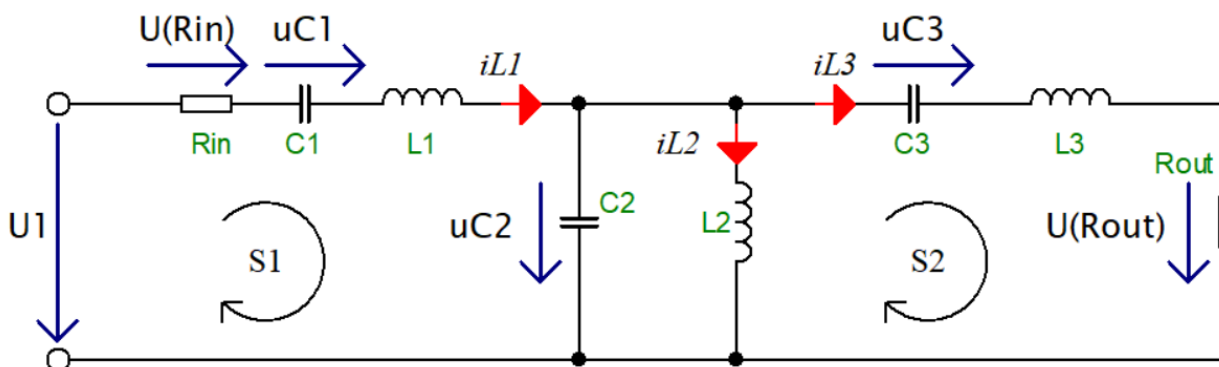
5 Odvodenie stavového modelu systému

5.1 Stavový popis systému

Stavový popis umožňuje zmodelovať náš systém inou metódou z využitím stavového priestoru (SS – State Space). Výhodou tejto metódy oproti priameho modelovania z diferenciálnych rovníc je to, že uvažuje informácie o vnútorných premenných (stavoch systému). Kvôli tomu, že výsledné zobrazenie systémových parametrov a premenných je maticovom tvare, môžeme ľahko zmodelovať náš systém v MATLAB.

5.2 Zostavenie stavového modelu elektrického systému

Stavovými veličinami sú tu prúd indukčnosťou i_L , lebo existuje derivácia $u_L = L \frac{di_L}{dt}$ a napätie na kondenzátore u_C , lebo existuje derivácia $i_C = C \frac{du_C}{dt}$. Stavový model nášho systému odvodíme z diferenciálnych rovníc I a II Kirchhoffovho zákonov a na základných vlastnosti elektrického obvodu. Všetky stavové veličiny majú fyzikálny význam. Vstupom do obvodu je vstupné napätie u_i (index i – input) a na výstupe dostávame výstupné napätie (napätie na kondenzátore) $u_o = u_{RL}$ (index o – output). Počet rovníc pre stavový popis rovná sa počtu zásobníkov energie v elektrickom obvode, v našom prípade máme 3 cievky a 3 kondenzátory[8].



Obr. 5.1 Elektrický obvod filtra s popisom stavových veličín

Zapišeme rovnice pre naše dve slučky, suma všetkých napätí v slučke sa rovná 0.

S1:

$$-u_i + R_{in}i_{L1} + u_{C1} + L_1 \frac{di_{L1}}{dt} + u_2 = 0 \quad (5.1)$$

S2:

$$-u_{C2} + R_{out}i_{L3} + u_{C3} + L_3 \frac{di_{L3}}{dt} = 0 \quad (5.2)$$

Algebraická suma prúdov v uzle A sa rovná 0.

A:

$$i_{L1} - i_{L2} - i_{L3} - C_2 \frac{du_{C2}}{dt} = 0 \quad (5.3)$$

Prúd, ktorý tečie vo vetve so sériovým zapojením je rovnaký na každom prvku.

$$C_1 \frac{du_{C1}}{dt} = i_{L1} \quad (5.4)$$

$$C_3 \frac{du_{C3}}{dt} = i_{L3} \quad (5.5)$$

Napätie v paralelnom obvode je rovnaké na každej vetve.

$$L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = u_{C2} \quad (5.6)$$

Vyjadrimo z rovníc prvú deriváciu stavovej veličiny.

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{u - u_{C1} - u_{C2} - R_{in}i_{L1}}{L_1} \quad (5.7)$$

$$\frac{di_{L3}}{dt} = \frac{u_{C2} - u_{C3} - R_{out}i_{L3}}{L_3} \quad (5.8)$$

$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{u_{C2}}{L_2} \quad (5.9)$$

$$\frac{du_{C2}}{dt} = \frac{i_{L1} - i_{L2} - i_{L3}}{C_2} \quad (5.10)$$

$$\frac{du_{C1}}{dt} = \frac{i_{L1}}{C_1} \quad (5.11)$$

$$\frac{du_{C3}}{dt} = \frac{i_{L3}}{C_3} \quad (5.12)$$

Prepíšeme rovnice do matice stavového popisu, základný tvar ktorého vyzerá:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{c}^T\mathbf{x}(t) + \mathbf{d}\mathbf{u}(t) \end{aligned} \quad (5.13)$$

Prepis do maticového zápisu stavového modelu:

$$\begin{bmatrix} sI_{L1} \\ sI_{L2} \\ sI_{L3} \\ sU_{C1} \\ sU_{C2} \\ sU_{C3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{in}}{L_1} & 0 & 0 & -\frac{1}{L_1} & -\frac{1}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_2} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_{out}}{L_3} & 0 & \frac{1}{L_3} & \frac{1}{L_3} \\ \frac{1}{C_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_2} & -\frac{1}{C_2} & -\frac{1}{C_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_3} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ I_{L3} \\ U_{C1} \\ U_{C2} \\ U_{C3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot U_i \quad (5.14)$$

$$U_{RL} = [0 \quad 0 \quad R_{out} \quad 0 \quad 0 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ I_{L3} \\ U_{C1} \\ U_{C2} \\ U_{C3} \end{bmatrix} + [0] \cdot U_i$$

5.3 Zostavenie priebehov LFCh a PrCh stavového modelu s pomocou MATLABu a Simulinku

Výpisy z MATLABu (preformátované):

Stavový model v symbolickom tvare:

A =

```

[-Rin/L1,    0,    0, -1/L1, -1/L1,    0]
[    0,    0,    0,    0,  1/L2,    0]
[    0,    0, -Rout/L3,    0,  1/L3, -1/L3]
[ 1/C1,    0,    0,    0,    0,    0]
[ 1/C2, -1/C2, -1/C2,    0,    0,    0]
[    0,    0,  1/C3,    0,    0,    0]

```

b =

```

1/L1
0
0
0
0
0

```

cT =

```

[0, 0, Rout, 0, 0, 0]

```

d =

0

Stavový po dosadení hodnôt parametrov:

A =

1.0e+10 *

-0.0000	0	0	-0.0000	-0.0000	0
0	0	0	0	0.0002	0
0	0	-0.0000	0	0.0000	-0.0000
2.6301	0	0	0	0	0
0.0110	-0.0110	-0.0110	0	0	0
0	0	2.6301	0	0	0

b =

1.0e+03 *

9.3815

0

0

0

0

0

CT =

0	0	50	0	0	0
---	---	----	---	---	---

d =

0

Výpis prenosovej funkcie:

nums =

1.0e+17 *

0	0	0	4.8564	0.0000	9.8313	-0.0000
---	---	---	--------	--------	--------	---------

dens =

1.0e+43 *

0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.5022
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Fss =

$$3.233\text{e-}26 s^3 + 1.644\text{e-}34 s^2 + 6.545\text{e-}26 s - 7.87\text{e-}43$$

$$6.657\text{e-}44 s^6 + 6.245\text{e-}38 s^5 + 4.943\text{e-}29 s^4 + 3.088\text{e-}23 s^3 + 1.22\text{e-}14 s^2 + 3.802\text{e-}09 s + 1$$

Póly prenosovej funkcie Fss:

p =

1.0e+07 *

-0.0123 + 1.6433i

-0.0123 - 1.6433i

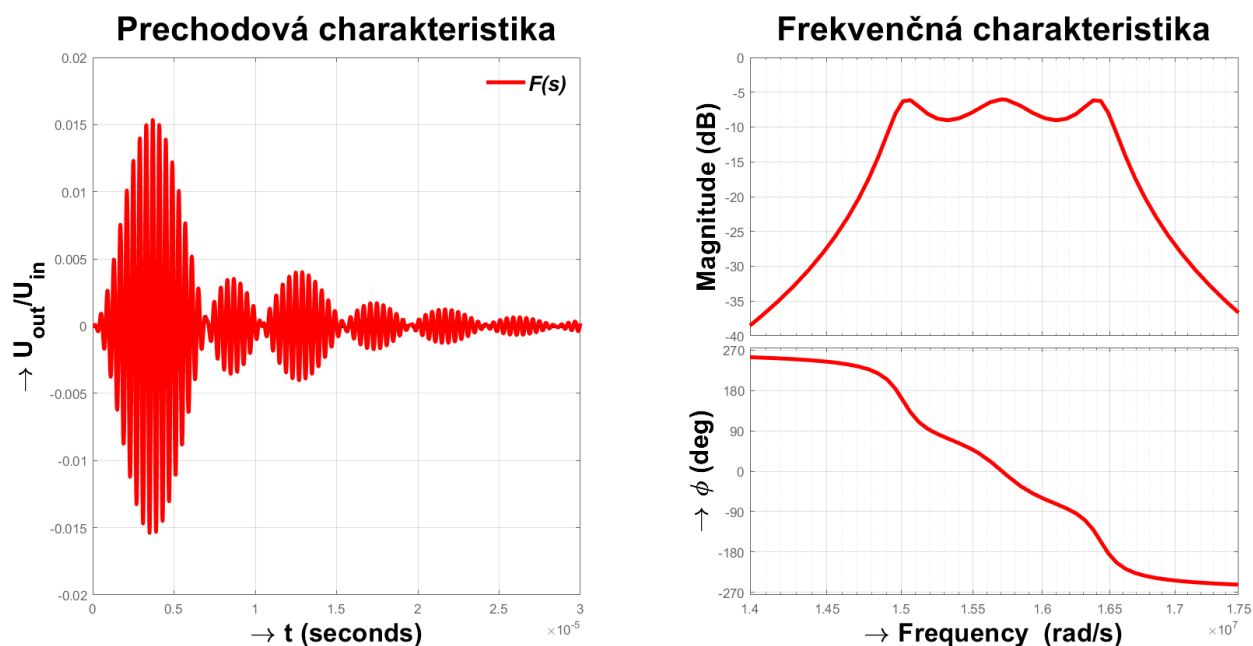
$$-0.0235 + 1.5706i$$

$$-0.0235 - 1.5706i$$

$$-0.0112 + 1.5014i$$

$$-0.0112 - 1.5014i$$

Zobrazenie prechodovej a frekvenčnej charakteristiky:



Obr. 5.2 PrCh a LFCh odvodené zo stavového popisu

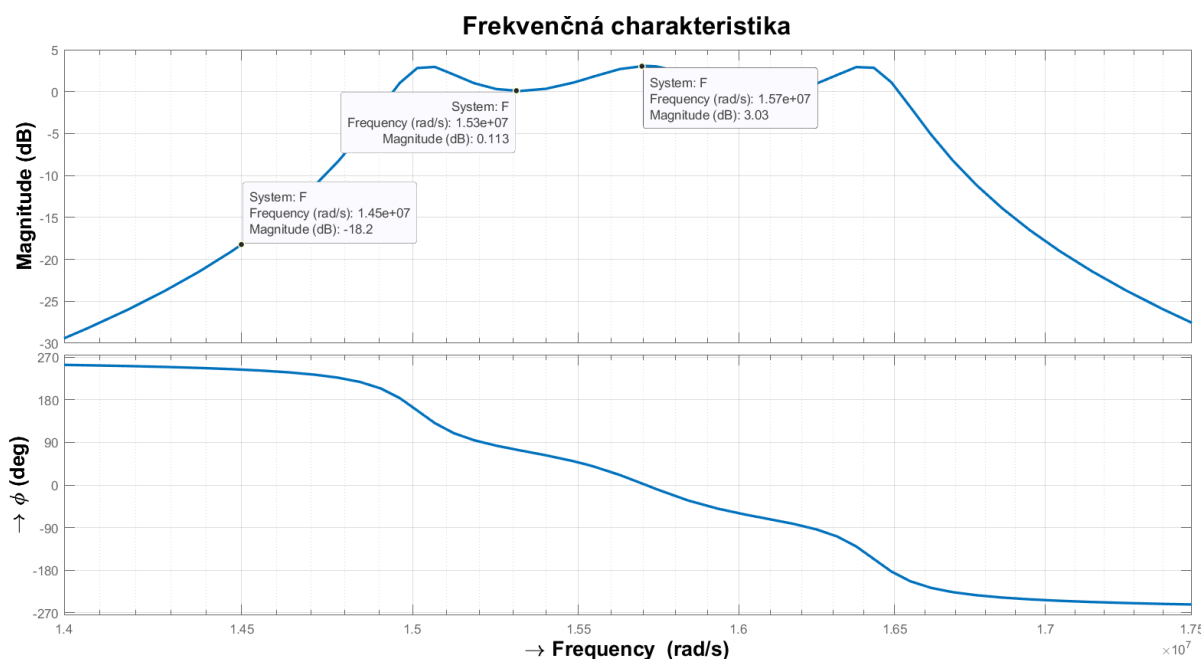
Priebehy majú veľmi podobný tvar ako na obr. a Obr.2.5 Kde sme modelovali pomocou prenosovej funkcie a v druhom prípade odozva modelu v Simulinku. Podobnosť grafov nám ukazuje na správnosť zostavenia modelu v stavovom priestore. Prenosová funkcia ktorá nám vyšla z stavového popisu ma iní tvar, v čitateli sa objavili členy nižších radov, menovateľ sa nezmenil. To je výsledok presností tejto metódy, pretože pozoruje aj priebeh vnútorných veličín. Frekvencia centru a šírka pasmá viditeľne sa ne zmenila.

6 Odozva systému na harmonický budiaci signál

V tejto úlohe budeme analyzovať vplyv harmonického budiaceho signálu na náš elektrický obvod. Z LFCh nášho systému môžeme vidieť, že pri rôznych frekvenciách signálu pôsobiach na náš systém sa mení amplitúda a fáza výstupného signálu. Toto je hlavná vlastnosť elektrického filtra.

6.1 Analýza LFCh

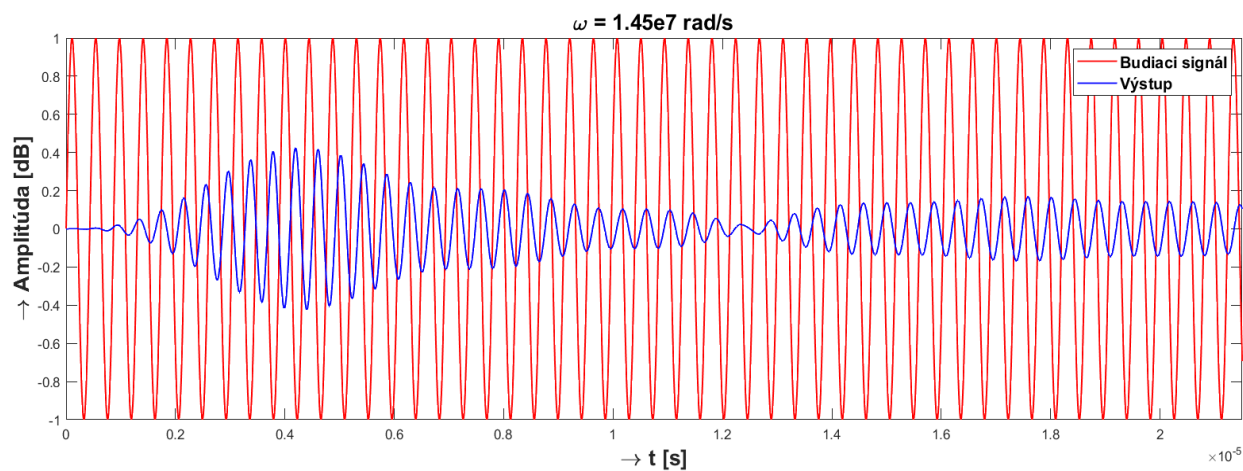
Pre lepšiu viditeľnosť zväčšíme systém o hodnotu **2.85**. V tomto prípade bude priepustné pásmo prechádzať na hodnote 0 dB. To znamená, že vstupné a výstupné signály budú mať rovnakú amplitúdu. Zvlnenie v priepustnom pásme vo výške 3 dB, ktoré sme si sami upravili, bude v absolútnej hodnote zodpovedať 3 dB.



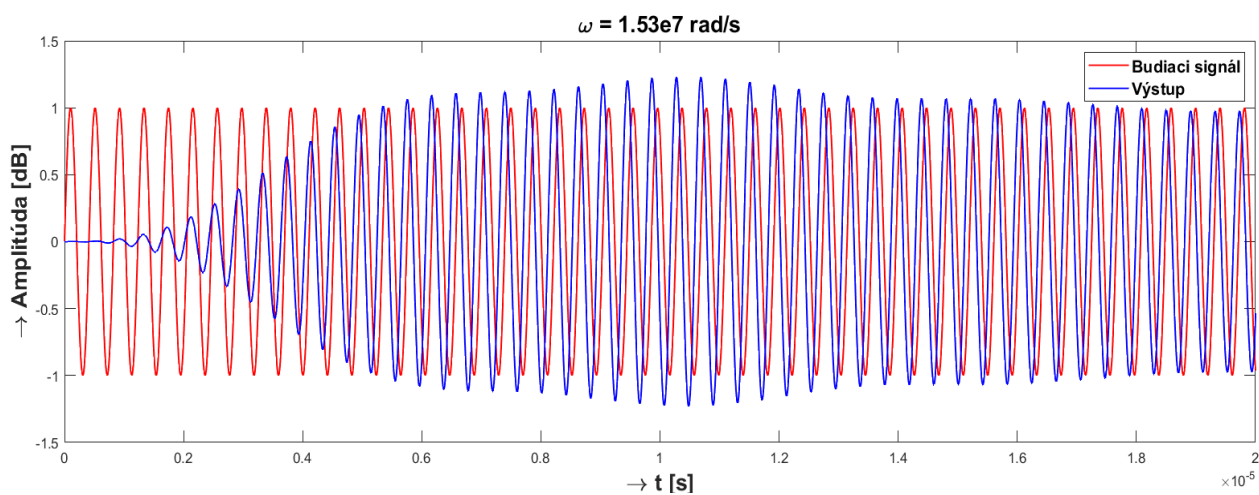
Obr. 6.1 LFCh systému zosilneného o hodnotu 2.85.

Obr.6.1 ukazuje LFCh po zosilnení sústavy o hodnotu **2.85**. Na LFCh Obr.6.1 sú tiež vyznačené 3 body zodpovedajúce frekvenciám, v ktorých budeme testovať vlastnosti systému. Prvý bod je na strmom náraste amplitúdy, druhý bod je na úrovni priepustného pásma, tretí bod na vrchole zvlnenie. Vygenerujme na vstupe systému jednotkový harmonický signál s príslušnou frekvenciou, ktorú budeme meniť. Simulácia tohto zadania bola realizovaná v MATLABe pomocou príkazov *gensig* a *lsim*.

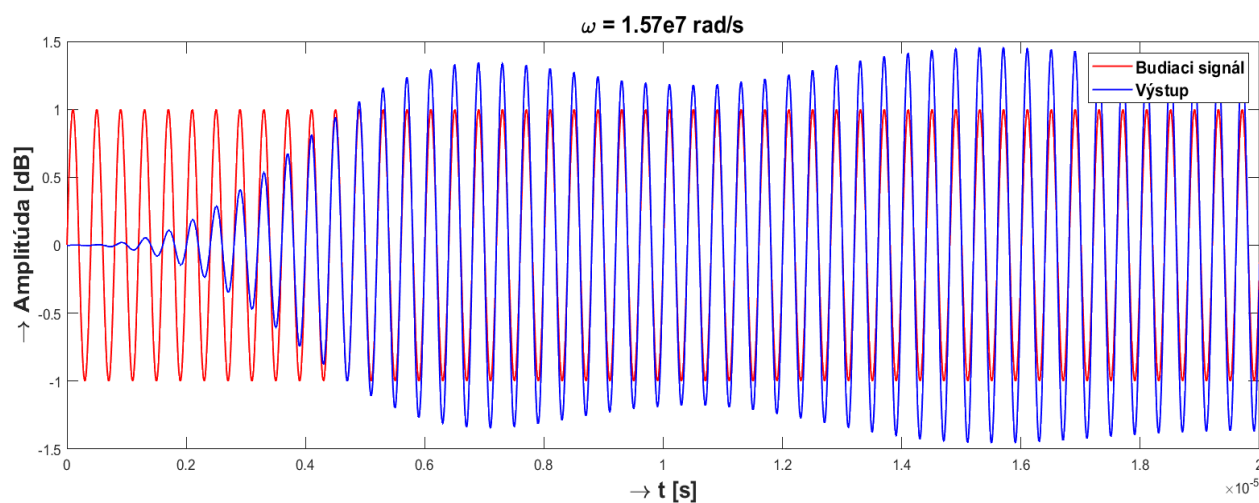
6.2 Odozvy



Obr. 6.2 Vstupný a výstupný signál pri frekvencii $\omega = 1.45e7 \text{ rad/s}$

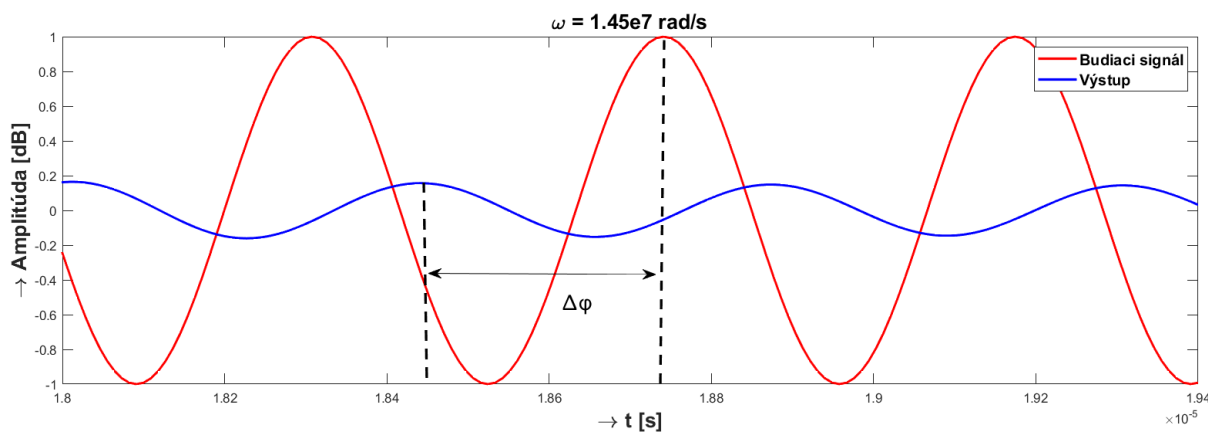


Obr. 6.3 Vstupný a výstupný signál pri frekvencii $\omega = 1.53e7 \text{ rad/s}$

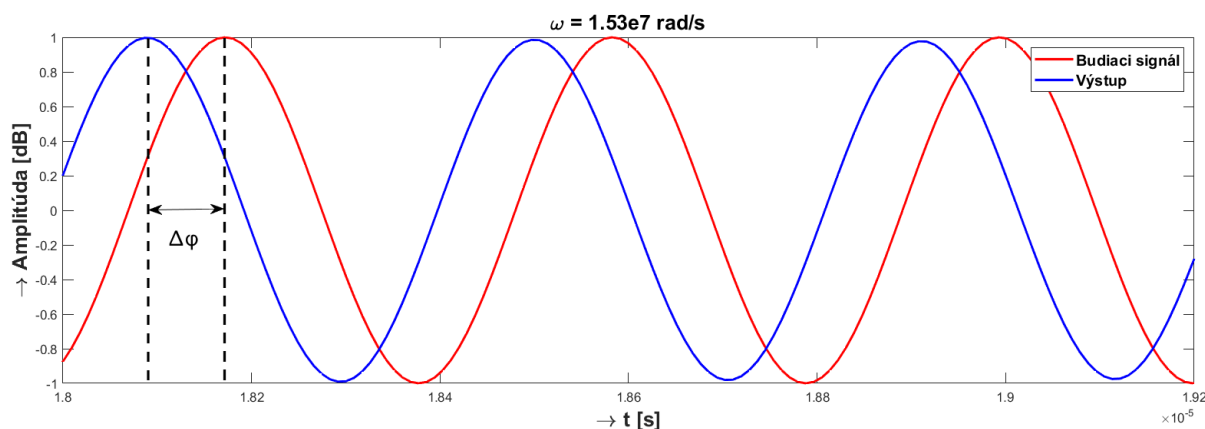


Obr. 6.4 Vstupný a výstupný signál pri frekvencii $\omega = 1.57e7 \text{ rad/s}$

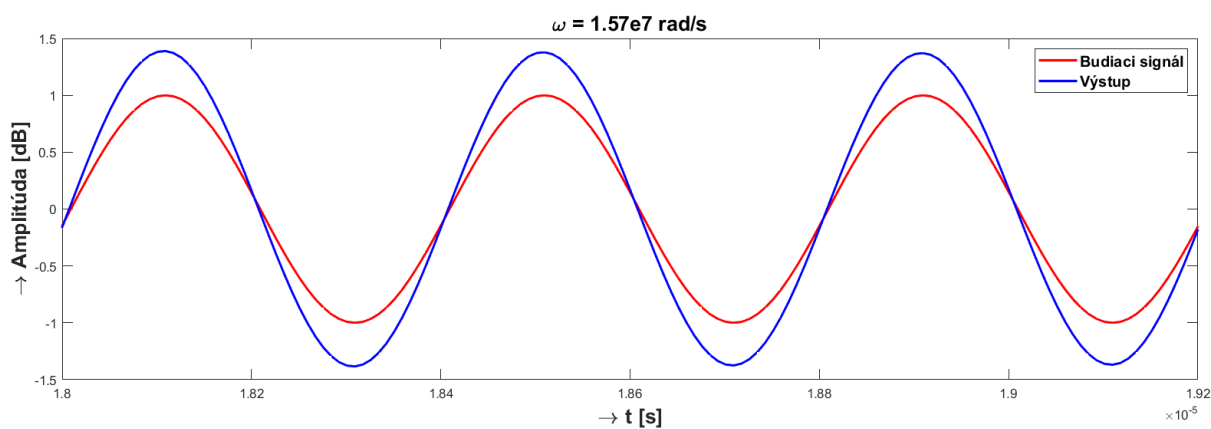
Na Obr.6.2-4 sledujeme odozvu na v rozsahu 50 periód vstupného harmonického signálu pričom $\omega = 2\pi f$. Vidíme, že amplitúda výstupného signálu závisí od frekvencie vstupného signálu v súlade s priebehom LFCh. Pre podrobnejšiu analýzu znížime rozsah sledovania na 3 periódy vstupného signálu a zvolíme dobu, kedy je efekt stabilný.



Obr. 6.5 Vstupný a výstupný signál pri frekvencii $\omega = 1.45e7 \text{ rad/s}$

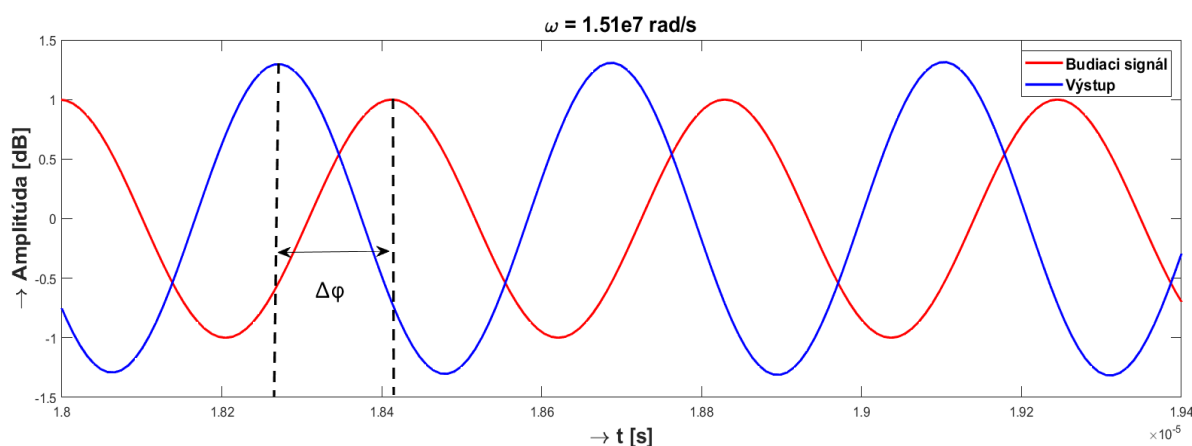


Obr. 6.6 Vstupný a výstupný signál pri frekvencii $\omega = 1.53e7 \text{ rad/s}$



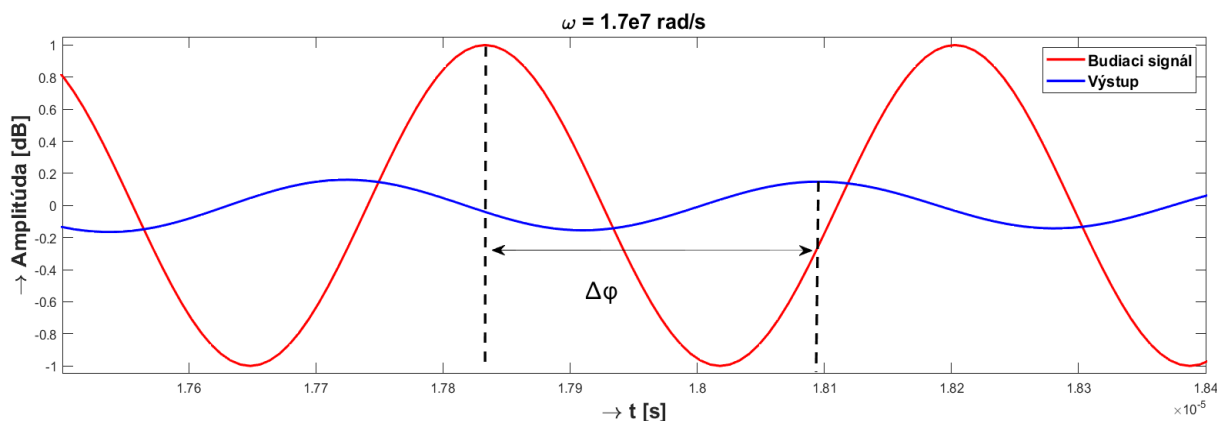
Obr. 6.7 Vstupný a výstupný signál pri frekvencii $\omega = 1.57e7 \text{ rad/s}$

Na Obr.6.5-7 môžeme vidieť aj fázový posun medzi vstupným a výstupným signálom. Ak porovnáme tento fázový posun na Obr.6.5-7 a fázové hodnoty pre body, ktoré sme vybrali na LFCh (Obr.1), vidíme, že tieto hodnoty sú rovnaké. Na Obr.7 vidíme nulový posun a najvyššiu amplitúdu výstupného signálu, frekvencia vstupného signálu je v tomto prípade rezonančná frekvencia a bod na strednom vrchole zvlňenia na LFCh (Obr.6.1) je bod rezonancie. Na LFCh (Obr.1) môžeme vidieť ďalšie dva rezonančné body, na dvoch krajných vrcholoch. Fázový posun pri tých rezonančných frekvenciách je ± 130 stupňov, Obr.6.8 (fázový posun 130 stupňov) LFCh.



Obr. 6.8 Vstupný a výstupný signál pri frekvencii $\omega = 1.51e7 \text{ rad/s}$

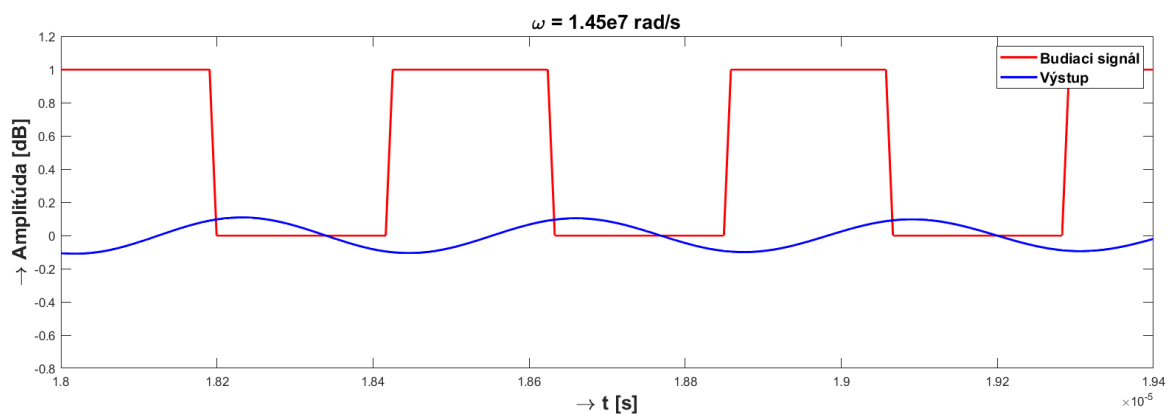
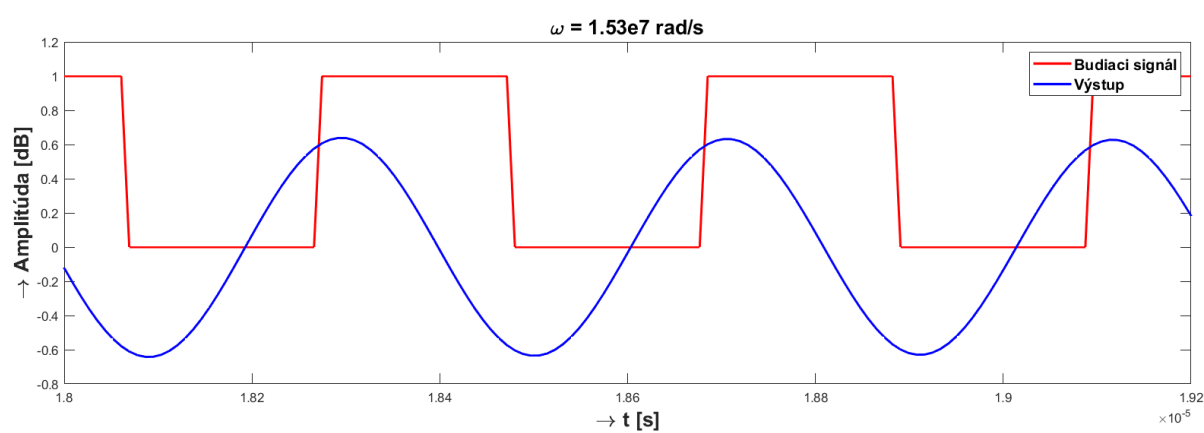
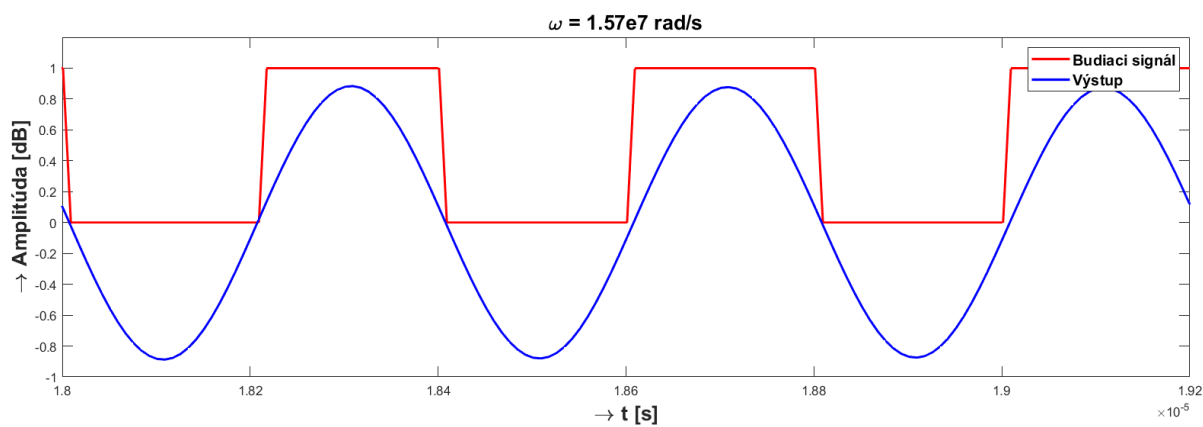
Táto úloha analýzy harmonickej odozvy systému vám pomôže lepšie pochopiť, ako treba čítať LFCh a čo táto charakteristika znamená z hľadiska vstupných a výstupných signálov.

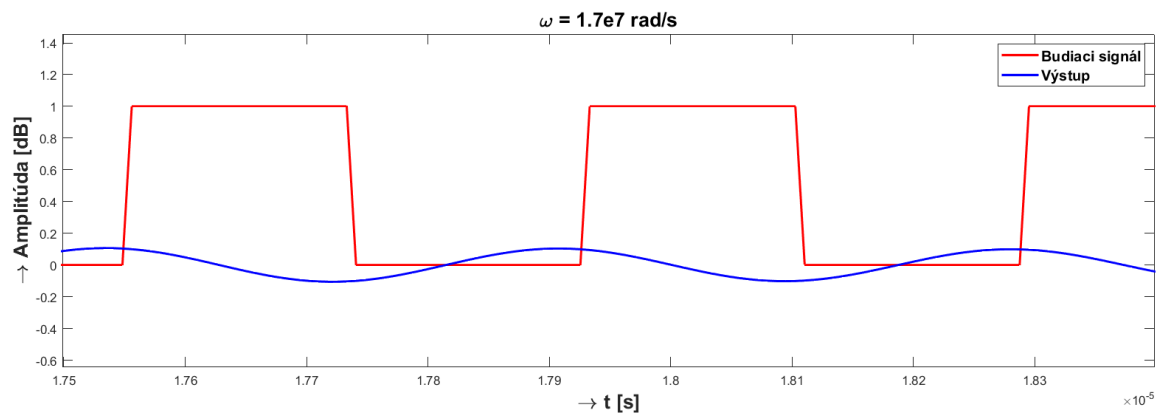


Obr. 6.9 Rozdiel signálov pri frekvencii $\omega = 1.7e7 \text{ rad/s}$

6.3 Odozva na obdĺžnikový signál

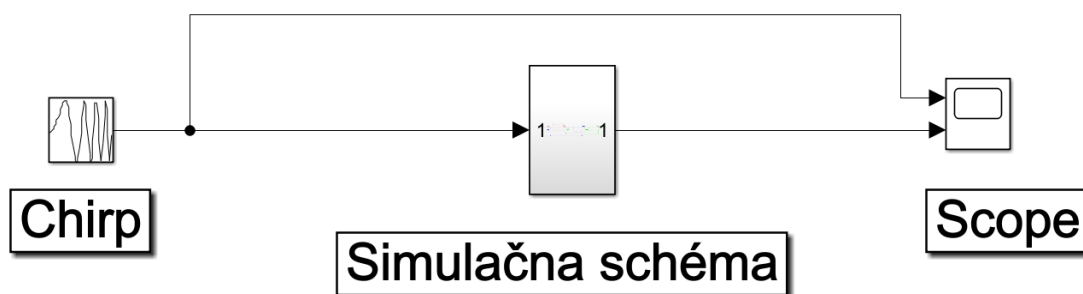
V tejto úlohe budeme simulovať odozvu nášho systému na digitálny obdĺžnikový signál s hodnotami 0 a 1. Frekvencie vstupných signálov preberieme z úlohy odozvy na harmonický signál. Z Obr.6.9-11 vidíme, že výstupný signál má podobný charakter ako pri odpovedi na vstupný harmonický signál, súlad medzi hodnotami amplitúd výstupných signálov a fázovým posunom s LFCh je zachovaný.

Obr. 6.10 Odozva na obdĺžnikový signál $\omega = 1.45e7 \text{ rad/s}$ Obr. 6.11 Odozva na obdĺžnikový signál $\omega = 1.53e7 \text{ rad/s}$ Obr. 6.12 Odozva na obdĺžnikový signál $\omega = 1.57e7 \text{ rad/s}$

Obr. 6.13 Odozva na obdĺžnikový signál $\omega = 1.7e7 \text{ rad/s}$

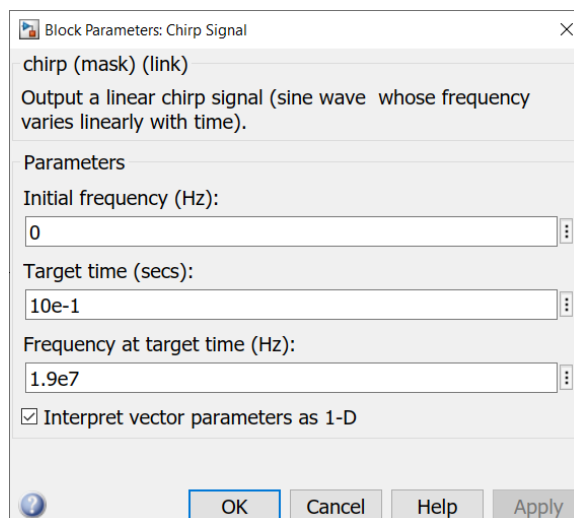
7 Odozva obvodu na harmonický signál s narastajúcou frekvenciou (chirp)

Odozva systému na harmonický signál so zvyšujúcou sa frekvenciou by mala odrážať vlastnosti LFCh. V dvoch prípadoch máme správu so zvyšujúcou sa frekvenciou. Na túto úlohu použijeme schému v Simulinku, ktorá zobrazuje náš systém. Na vstup simulačnej schémy pripojíme blok *Chirp*, na zobrazenie výsledku použijeme blok *Scope*. Aktuálny signál *Chirp* a odozva systému na tento signál sa zobrazia v bloku *Scope* (Obr.1).

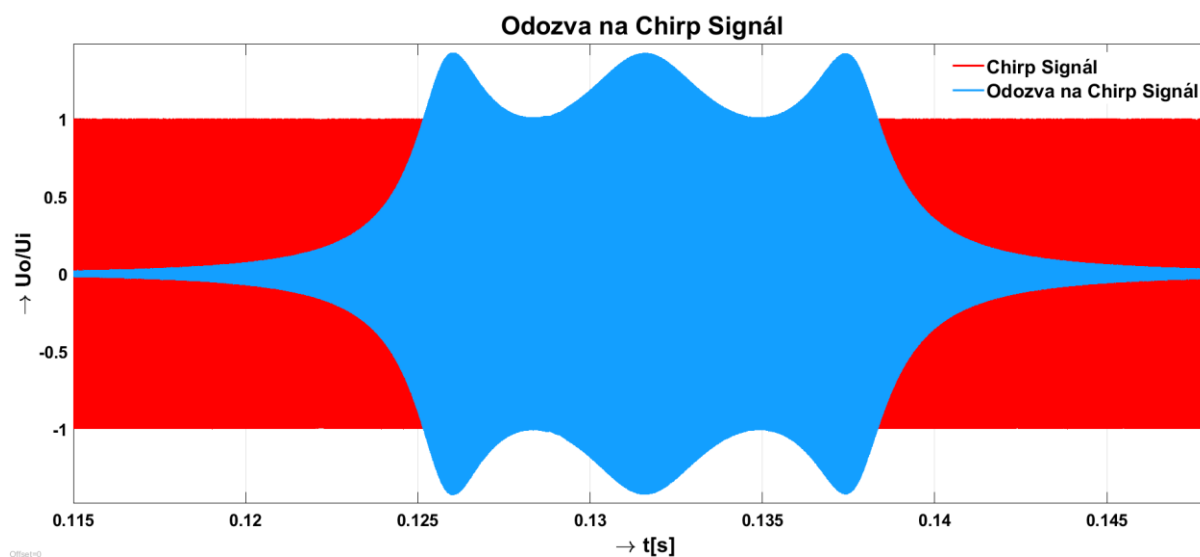


Obr. 7.1 Schéma v Simulink pre odozvu na *Chirp* signál

Blok *Chirp* generuje jeden harmonický signál, ktorého frekvencia sa mení podľa nastavení tohto bloku. Je dôležité zvoliť správne nastavenia pre *Chirp* blok, aby sme dosiahli požadovaný výsledok (Obr.7.2).



Obr. 7.2 Nastavenie v bloku Chirp Signal

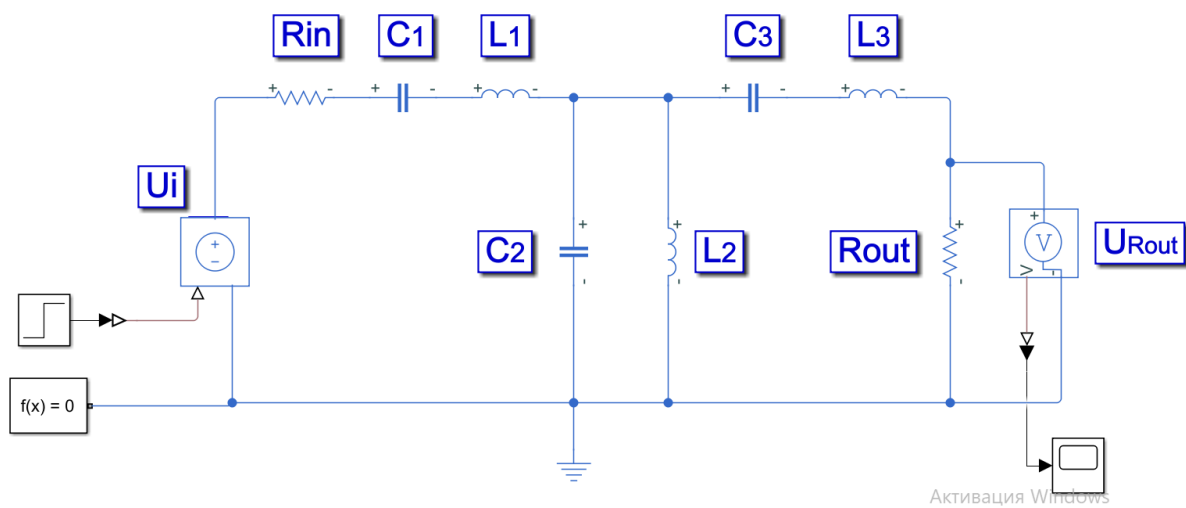


Obr. 7.3 Odozva na Chirp Signál

Obr.7.3 zobrazuje odozvu nášho systému na harmonický signál so zvyšujúcou sa frekvenciou. Charakteristika odozvy je podobná, ako pri LFCh, existuje časový interval, kedy je amplitúda výstupného signálu väčšia alebo rovná vstupnému signálu, odozva na chirp signál má charakter priepustného pásma. Zvlnenie v priepustnom pásme je rovnaké ako v LFCh, charakteristické pre Čebyševov filter.

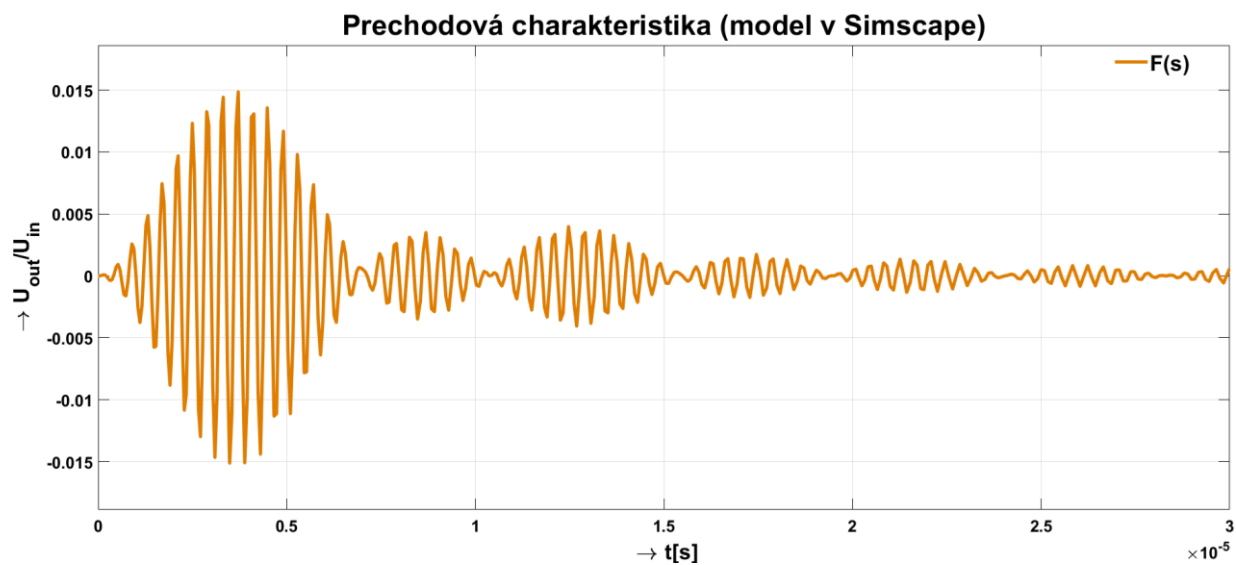
8 Model v Simscape

Vytvorme si model nášho elektrického obvodu v programe Simscape. Na rozdiel od Simulink, v Simscape môžeme vytvoriť presnejší model so skutočnými elektrickými prvkami, čo znamená analýzu fyzikálnych vlastností nášho systému. Každý prvok v Simscape má svoje vlastnosti ktoré určené podľa zodpovedajúceho skutočného objektu. Na grafoch, teda môžeme sledovať, ako sa bude správať jeho fyzikálny model, a nie matematický.



Obr. 8.1 Elektrický obvod systému v Simscape

Ako môžete vidieť z Obr8..1, model v Simscape pozostáva z prvkov elektrického obvodu s príslušnými hodnotami, zdroja napätia a voltmetra, ktorý bude merať napätie na odpore R_L . Vidíme aj prevodníky zo Simulinku do Simscape a naopak. Sú potrebné na to, aby sme mohli jednoduchšie zostaviť vstupný signál v digitálnej forme a aby sme zbierali údaje z voltmetra a na základe nich zostavili charakteristiku. V skutočnosti sa takéto prvky dajú porovnať s prevodníkmi AD a DA.

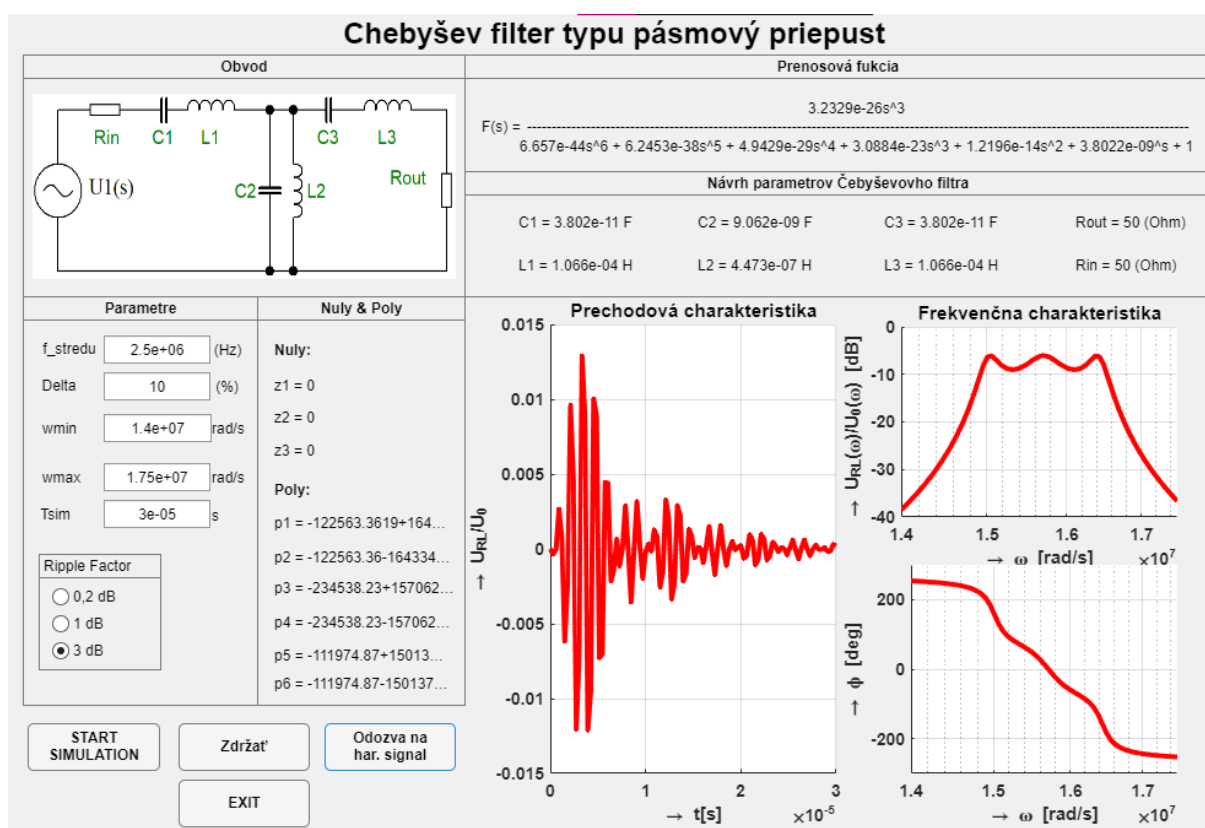


Obr. 8.2 PrCh z modelu v Simscape

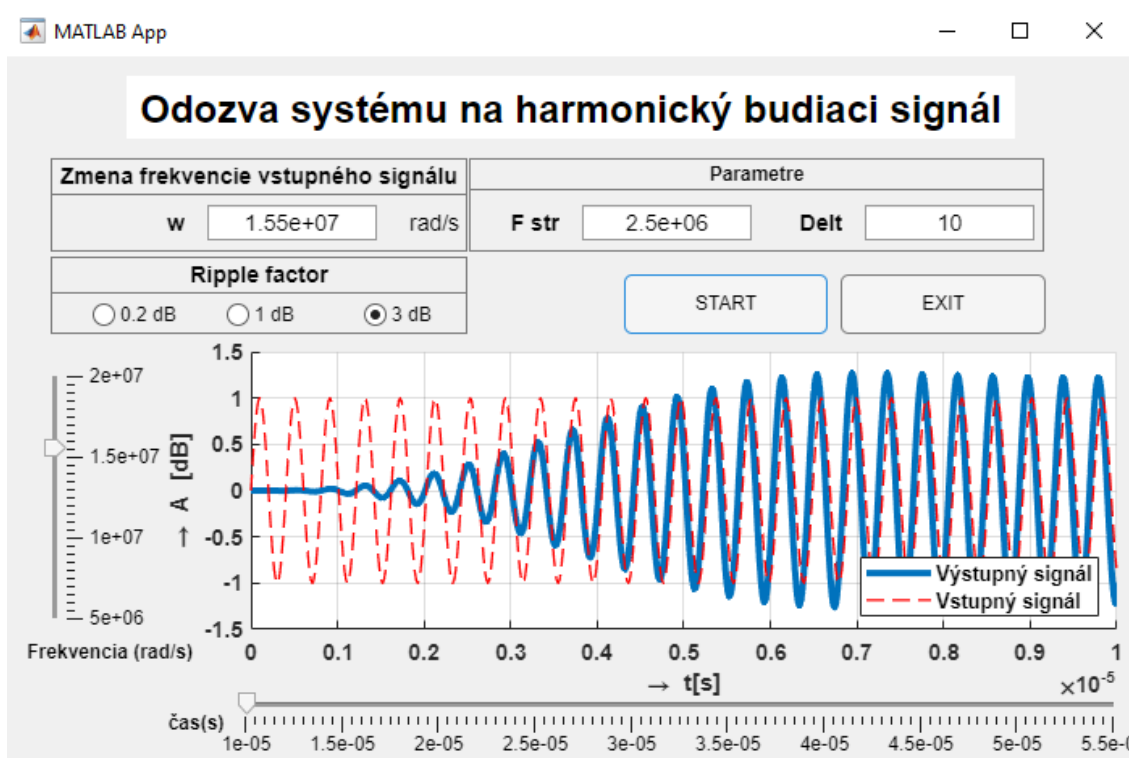
Priebehy modelu v Simscape majú taký istý tvar, ako všetky priebehy ktoré sme pozorovali v predchádzajúcich kapitolách. To znamená, že naša matematická model je vhodná pre analýzu fyzických vlastností kvôli podobnosti z fyzikálnej modely.

9 Grafický používateľský interfes (GUI)

V tejto kapitole budeme sa zaoberať navrhovaním GUI (Graphical User Interface) podľa nášho systému v MATLABE pomocou vyvojového prostriedku AppDesigner [9][10]. Náš program bude obsahovať ak pasívne prvky, ktoré sú statické tak aj aktívne prvky, ktoré vieme zmeniť, aj s tým zmeniť celý systém prostredníctvom napríklad parametrov systému. Pomocou nášho grafického interfejsu, môžeme jednoduchšie a efektívnejšie analyzovať a experimentovať nad našim systémom. Jednoduchosť spočíva v tom, že používateľ nepotrebuje doberať sa do kódu, ktorým modelujeme náš systém a môže priamo v grafickom prostredí pozorovať vplyv jednotlivých parametrov a graphy, ktoré predstavujú odozvu systému. Kod programu GUI v prílohe B.



Obr. 9.1 Grafické rozhranie systému



Obr. 9.2 Graph odozvy systému na harmonický budiací signál

Záver

Pri analýze elektrického obvodu, ktorí sme dostali, zistili, že naša práca bude venovaná filteru Čebyševa typu 1. pásmový priepust. Z pomocných zdrojov informácií parametre elektrického obvodu boli navrhnuté podľa požadovaných vlastností filtra: zvlnenie v pásme priepustu, frekvencia stredy, šírka pásma priepustu.

Bol vytvorený matematický model systému. Pomocou poznatkov z kurzu matematickej analýzy I a II Kirchhoffových zákonov sme našli prenosové funkcie nášho systému. Pomocou MATLABu tieto funkcie boli nájdené v symbolickom a numerickom tvare. Po vykreslení grafov prenosových funkcií sme dospeli k záveru, že náš systém je navrhnuté správne a spĺňa naše požiadavky. Taktiež boli skúmane zmeny v systéme, ktoré nastali pri zmene každého z jeho parametrov. Pre identifikáciu týchto zmien boli vytvorené charakteristiky PrCh a LFCh systému v MATLABe.

Ďalším krokom bolo vytvorenie simulačného modelu pomocou programu Simulink. Tento model dáva lepší vzhľad na súvis medzi jednotlivými parametrami obvodu. Po zostavení modelu boli grafy totožné, čo naznačovalo správnosť nášho riešenia. Bol odvodený stavový model systému, ktorý reprezentoval informáciu o vnútorných premenných systému. Čo je presnejší model nášho SISO systému.

Jednou z úloh bolo overiť odozvu systému na harmonický budiaci signál. Na tento účel sme priviedli signál s určitou frekvenciou na vstup a skúmali, ako sa zmení výstupný signál, lepšie porozumieť o, čo ide v LFCh.

Ďalej sme sa zoznámili s programom Simscape, zvážili jeho výhody oproti Simulinku a výsledkom bolo vytvorenie modelu filtra v Simscape a vykresľovanie grafov fyzických procesov prebiehajúcich v našom systéme.

Jednou z najdôležitejších častí práce bolo vybudovať rozhranie, ktoré by bolo zrozumiteľné pre bežných používateľov. Na tento účel sme vytvorili rozhranie GUI v programe AppDesigner. To zjednodušilo vizuálnu časť nášho projektu a sprístupnilo ho bežným používateľom.

Stručne povedané, v tomto projekte sme sa naučili simulovať elektrické systémy. Upevnili sme si znalosti z práce v MATLABe a osvojili si aj nové programy, pomocou ktorých sme simulovali náš systém. Zvládli sme tiež rôzne simulačné metódy, analyzovali sme kladne a záporne stránky každého z nich a nakreslili sme každú metódu pre názornejšiu demonštráciu.

Zoznam použitej literatúry

- [1] Design of 0.5 dB equal ripple band pass filter <https://www.youtube.com/watch?v=zFTwKzQFd3Q>, [online: April 2023]
- [2] Butterworth and Chebyshev Filters <https://inlnk.ru/XOB330>, [online: April 2023]
- [3] Fedák, V.: Modelovanie elektromechanických sústav. Prednášky, ZS 2022/23. KEM FEI TU v Košiciach.
- [4] Fedák, V.: Modelovanie elektromechanických sústav. Technická univerzita v Košiciach. Košice 2015. ISBN: 978-80-553-2111-0.
- [5] Circuit analysis | Electrical engineering | Science | Khan Academy <https://www.khanacademy.org/science/electrical-engineering/ee-circuit-analysis-topic>, [online: April 2023].
- [6] Node Voltage Method Circuit Analysis With Current Sources <https://www.youtube.com/watch?v=BMnFC63m1fQ&t=372s>, [online: April 2023].
- [7] Mesh Current Problems - Electronics & Circuit Analysis <https://www.youtube.com/watch?v=k5Tlg27JDtc&t=174s> [online: April 2023].
- [8] Control Systems Lecture 21 Exercise 127: State-space model of an electric circuit <https://www.youtube.com/watch?v=sL0LtyfNYkM> [online: April 2023].
- [9] How to Make an Interactive App in MATLAB, <https://www.youtube.com/watch?v=SpAp7QACF34>, [online: April 2023].
- [10] UIAxes Properties, <https://nl.mathworks.com/help/matlab/ref/matlab.ui.control.uiaxes-properties.html>, [online: April 2023].

Prílohy

Príloha A: MSE.m(program pre výpočet prenosov, kreslenie charakteristík, a pod).

```
% Program pre výpočet TF a SS pomocou symb.MATLABu. Holysh-Chernozub
% Simulácia a znázornenie PrCH a LFCH
% Príklad: Chebyševov filter typ 1
clc, clear, clf, format compact
syms s Rs Rl L1 L2 L3 C3 C1 C2 Ur Ui

%% Zadanie vstupných hodnôt
disp('Filter Chebysheva typu pásmový priepust')
g1=3.3487; g2=0.7117; g3=g1; del=0.10; f0=2.5e6;
Rsx=50; Rlx=50; Rx=50;
L1x=(g1*Rx)/(2*pi*f0*del); L2x=(Rx*del)/(g2*2*pi*f0); L3x=(g3*Rx)/(2*pi*f0*del);
C1x=del/(g1*Rx*2*pi*f0); C2x = g2/(Rx*2*pi*f0*del);
C3x=del/(g3*Rx*2*pi*f0); % parametre obvodu
Ui=1;
Tstep=3e-5; wmin=1.4e7; wmax=1.75e7 % parametre pre Step a Bode
color='b'; % farba grafu

%% MSP
disp('MSP')
% Zápis systému a výpočet TF v symbolickom tvare
Ze=(L2*s)/(1+L2*C2*s^2);
Z=[Ze+Rs+1/(s*C1)+L1*s -Ze; -Ze Ze+Rl+1/(s*C3)+s*L3] % matica impedancií obvodu
u=[Ui;0] % vektor napätí obvodu (i=input)
ZI2=[Z(:,1) u ] % submatica pre I2, pre I1 by to bolo: ZI1=[u Z(:,2)]
I2=det(ZI2)/det(Z) % výpočet slučkového prúdu I2 Cramerovým pravidlom
Ur=Rl*I2 % výstupné napätie na R2 (Ohmov zákon), (o - output)
F=Ur/Ui % TF F(s) = Uo(s)/Ui(s) v symbolickom tvare
F=collect(F)
pretty(F)
% Spracovanie údajov TF v symbolickom tvare pre prechod do num. MATLABu
[ci,men]=numden(F) % oddelenie polynómov čitateľa a menovateľa
ci=subs(ci,{Rl,Rs,L1,L2,L3,C1,C2,C3},{Rlx,Rsx,L1x,L2x,L3x,C1x,C2x,C3x}); % dosadenie
% hodnôt do polynómu čitateľa
men=subs(men,{Rl,Rs,L1,L2,L3,C1,C2,C3},{Rlx,Rsx,L1x,L2x,L3x,C1x,C2x,C3x}); % dosadenie do
% polynómu menovateľa
b=sym2poly(ci) % b - koeficienty polynómu čitateľa b(s)
a=sym2poly(men) % a - koeficienty polynómu menovateľa a(s)
b=double(b) % Prechod do numerického MATLABu
a=double(a)
F=tf(b,a) % Výsledná TF v numerickom MATLABe
F=tf(b/a(end),a/a(end))% TF upravená pre a0=1 (normovanie TF)
%{
%% Vykresľovanie a popis priebehov PrCh a LFCh
figure(1)

subplot(121);
step(F,Tstep), grid on,
title('Prechodová charakteristika','FontSize',20,'FontWeight','bold')
legend('F','Orientation','vertical','FontAngle',
'italic','FontSize',16,'FontWeight','bold')
xlabel('\rightarrow t','FontSize',16,'FontWeight','bold')
ylabel('\rightarrow U_R/U_{in}','FontSize',16,'FontWeight','bold')
%LFCh
subplot(122); bode(F,{wmin,wmax}), grid on
title('Frekvenčná charakteristika','FontSize',20,'FontWeight','bold')
xlabel('\rightarrow Frequency','FontSize',16,'FontWeight','bold')
ylabel('\rightarrow \phi','FontSize',16,'FontWeight','bold')
set(findall(gcf,'type','line'),'linewidth',2)

% Výpočet nulov a polov systému
```

```

z1=zero(F)
p1=pole(F)

%% Odozva har. signal
F=F*3;
figure(2)
bode(F,{wmin,wmax}), grid on
title('Frekvenčná charakteristika','fontSize',20,'FontWeight','bold')
xlabel('\rightarrow Frequency','FontSize',16,'FontWeight','bold')
ylabel('\rightarrow \phi','FontSize',16,'FontWeight','bold')
set(findall(gcf,'type','line'),'linewidth',2)
n=50;
figure(3)
legend('F(s)','Orientation','horizontal','FontAngle','italic','FontSize',16)
w1=1.45e7; T1=2*pi/w1; Tkon1=n*T1; % volba frekv, doba periody, doba kon.
[u1,t1]=gensig('sine',T1,Tkon1,T1/24); %('sine','square' doba periody, trvanie signálu,
lsim(F,u1,t1),grid on % formatovanie nadpisu grafu fonty: vypis hondoty
frekvencie do nadpisu, použite skratiek \it italics, \rm normal, \bf bold
xlim([0,Tkon1]);
title ('\omega = 10 rad/s');
ylabel('\rightarrow Amplitúda [dB]'), xlabel('\rightarrow t [s]');

figure(4)
w1=1.53e7; T1=2*pi/w1; Tkon1=n*T1; % volba frekv, doba periody, doba kon.
[u1,t1]=gensig('sine',T1,Tkon1,T1/24); % doba periody, trvanie signálu, vzorkovanie
lsim(F,u1,t1),grid on % formatovanie nadpisu grafu fonty: vypis hondoty
frekvencie do nadpisu, použite skratiek \it italics, \rm normal, \bf bold
xlim([0,Tkon1]);
title ('\omega = 45 rad/s');
ylabel('\rightarrow Amplitúda [dB]'), xlabel('\rightarrow t [s]');

figure(5)
w1=1.57e7; T1=2*pi/w1; Tkon1=n*T1; % volba frekv, doba periody, doba kon.
[u1,t1]=gensig('sine',T1,Tkon1,T1/24); % doba periody, trvanie signálu, vzorkovanie
lsim(F,u1,t1),grid on % formatovanie nadpisu grafu fonty: vypis hondoty
frekvencie do nadpisu, použite skratiek \it italics, \rm normal, \bf bold
xlim([0,Tkon1]);
title ('\omega = 667 rad/s');
ylabel('\rightarrow Amplitúda [dB]'), xlabel('\rightarrow t [s]');

%% State Space
clear
syms s Rs Rl L1 L2 L3 C3 C1 C2 Ur Ui
disp('Stavový model v symbolickom tvare:')

A=[-Rs/L1 0 0 -1/L1 -1/L1 0
    0 0 0 0 1/L2 0
    0 0 -Rl/L3 0 1/L3 -1/L3
    1/C1 0 0 0 0 0
    1/C2 -1/C2 -1/C2 0 0 0
    0 0 1/C3 0 0 0]
b=[1/L1; 0; 0; 0; 0; 0]
cT=[0 0 Rl 0 0 0]
d=[0]

disp('paramere obvodu:');
g1=3.3487; g2=0.7117; g3=g1; del=0.10; f0=2.5e6;
Rlx=50; Rlx=50; Rx=50;
%L1x=35.47e-3; C1x=1.428e-6; L2x = 1.432; C2x = 35.38e-9; C3x=3.010e-6; L3x = 16.83e-3;
L1x=(g1*Rx)/(2*pi*f0*del); L2x=(Rx*del)/(g2*2*pi*f0); L3x=(g3*Rx)/(2*pi*f0*del);
C1x=del/(g1*Rx*2*pi*f0); C2x = g2/(Rx*2*pi*f0*del); C3x=del/(g3*Rx*2*pi*f0); % paramere
obvodu
Ui=1;
Tstep=3e-5; wmin=1.4e7; wmax=1.75e7; % parametre pre Step a Bode
color='r'; % farba grafu

```

```

Rs=Rsx; Rl=Rlx; L1=L1x; L2=L2x; L3=L3x; C1=C1x; C2=C2x; C3=C3x;

disp('Stavový po dosadení hodnôt parametrov:')
A=[-Rs/L1 0 0 -1/L1 -1/L1 0
    0 0 0 1/L2 0
    0 0 -Rl/L3 0 1/L3 -1/L3
    1/C1 0 0 0 0 0
    1/C2 -1/C2 -1/C2 0 0 0
    0 0 1/C3 0 0 0]
b=[1/L1; 0; 0; 0; 0; 0]
cT=[0 0 Rl 0 0 0]
d=[0]

sys = ss(A,b,cT,d);

disp('Výpis stavového modelu:')
printsys(A,b,cT,d);

disp('Výpis prenosovej funkcie:')
[nums,dens]=ss2tf(A,b,cT,d)
Fss=tf(nums/dens(end),dens/dens(end))

disp('Vlastné hodnoty matice A:')
eig(A)

disp('Póly prenosovej funkcie Fss:')
p=pole(Fss)

format short

figure(6)
subplot(121);
step(sys,Tstep,color), grid on,
title('Prechodová charakteristika (State Space)', 'FontSize',20, 'FontWeight','bold')
legend('Fss(s)', 'Orientation','vertical', 'FontAngle',
'italic', 'FontSize',16, 'FontWeight','bold')
xlabel('\rightarrow t', 'FontSize',16, 'FontWeight','bold')
ylabel('\rightarrow U_R/U_{in}', 'FontSize',16, 'FontWeight','bold')
%LFCh
subplot(122); bode(sys,{wmin,wmax},color), grid on
title('Frekvenčná charakteristika (State Space)', 'fontsize',20, 'FontWeight','bold')
xlabel('\rightarrow Frequency', 'FontSize',16, 'FontWeight','bold')
ylabel('\rightarrow \phi', 'FontSize',16, 'FontWeight','bold')
set(findall(gcf,'type','line'),'linewidth',2)

```

Príloha B: MUN.m (program pre výpočet prenosov metódou uzloveho napatia).

```

clc, clear, clf, format compact
syms s Rs Rl L1 L2 L3 C3 C1 C2 Ur Ui

%% Zadanie vstupných hodnôt
disp('Filter Chebysheva typu pásmový priepust')
g1=3.3487; g2=0.7117; g3=g1; del=0.10; f0=2.5e6;
Rsx=50; Rlx=50; Rx=50;
L1x=(g1*Rx)/(2*pi*f0*del); L2x=(Rx*del)/(g2*2*pi*f0); L3x=(g3*Rx)/(2*pi*f0*del);
C1x=del/(g1*Rx*2*pi*f0); C2x = g2/(Rx*2*pi*f0*del); C3x=del/(g3*Rx*2*pi*f0); %
parametre obvodu
Ui=1;
Tstep=3e-5; wmin=1.4e7; wmax=1.75e7 % parametre pre Step a Bode
color='b'; % farba grafu

%% MUN

```

```

disp('MUN')
% Zápis systému a výpočet TF v symbolickom tvare

Ze=(L2*s)/(1+L2*C2*s^2);           %Ekvivalentny odpor paralelného zapojenia C2 a
L2
Z1=(s*Rs*C1+L1*C1*s^2+1)/(s*C1);   %Ekvivalentny vetvy z odporami Rs C1 a L1
Z3=(s*R1*C3+L3*C3*s^2+1)/(s*C3);   %Ekvivalentny vetvy z odporami R1 C3 a L3
F = (Ze*R1)/(Ze*Z3+Z1*Z3+Ze*Z1);

F=collect(F)
pretty(F)
% Spracovanie údajov TF v symbolickom tvare pre prechod do num. MATLABu
[cit,men]=numden(F) % oddelenie polynómov čitateľa a menovateľa
cit=subs(cit,{R1,Rs,L1,L2,L3,C1,C2,C3},{R1x,Rsx,L1x,L2x,L3x,C1x,C2x,C3x}); %
dosadenie hodnôt do polynómu čitateľa
men=subs(men,{R1,Rs,L1,L2,L3,C1,C2,C3},{R1x,Rsx,L1x,L2x,L3x,C1x,C2x,C3x}); %
dosadenie do polynómu menovateľa

b=sym2poly(cit) % b - koeficienty polynómu čitateľa b(s)
a=sym2poly(men) % a - koeficienty polynómu menovateľa a(s)
b=double(b) % Prechod do numerickeho MATLABu
a=double(a)
F=tf(b,a) % Výsledná TF v numerickom MATLABe
F=tf(b/a(end),a/a(end))% TF upravená pre a0=1 (normovanie TF)

subplot(121);
step(F,Tstep), grid on,
title('Prechodová charakteristika MUN','FontSize',20,'FontWeight','bold')
legend('F','Orientation','vertical','FontAngle',
'italic','FontSize',16,'FontWeight','bold')
xlabel('\rightarrow t','FontSize',16,'FontWeight','bold')
ylabel('\rightarrow U_R/U_{in}','FontSize',16,'FontWeight','bold')
%LFCh
subplot(122); bode(F,{wmin,wmax}), grid on
title('Frekvenčná charakteristika MUN','fontSize',20,'FontWeight','bold')
xlabel('\rightarrow Frequency','FontSize',16,'FontWeight','bold')
ylabel('\rightarrow \phi','FontSize',16,'FontWeight','bold')
set(findall(gcf,'type','line'),'linewidth',2)

```

Príloha C: GUI_Chebyshev_filter.mlapp (program pre vytvorenie grafického používateľského rozhrania)

```

app.Labelnum.Text = ' '; % vymaze citatel TF
app.Labeliden.Text = ' '; % vymaze menovatel TF
Tsim = app.TsimEditField.Value;
f0 = app.f_streduEditField.Value;
del = app.DeltaEditField.Value;
del = del/100;
g1=3.3487;
g2=0.7117;
g3=3.3487;
R=50;
L1 = (g1*R)/(2*pi*f0*del);
L2 = (R*del)/(g2*2*pi*f0);
L3 = (g3*R)/(2*pi*f0*del);
C1 = del/(g1*R*2*pi*f0);

```

```

C2 = g2/(R*2*pi*f0*del);
C3 = del/(g3*R*2*pi*f0);
num = [C1*C3*L2*R 0 0 0]
den = [C1*C2*C3*L1*L2*L3 C1*C2*C3*L1*L2*R+C1*C2*C3*L2*L3*R
C1*C2*L1*L2+C1*C3*L1*L2+C1*C3*L1*L3+C1*C3*L2*L3+C2*C3*L2*L3+C1*C2*C3*L2*R*R
C1*C3*L1*R+C1*C3*L2*R+C2*C3*L2*R+C1*C2*L2*R+C1*C3*L2*R+C1*C3*L3*R
C1*L1+C1*L2+C2*L2+C3*L2+C3*L3+C1*C3*R*R C3*R+C1*R 1]
num=double(num);
den=double(den);
num=num/den(end);
den=den/den(end);
app.Labelnum.Text = [num2str(num(1)), 's^3'];
app.Labelden.Text = [num2str(den(1)), 's^6 + ', num2str(den(2)), 's^5 + ',
num2str(den(3)), 's^4 + ', num2str(den(4)), 's^3 + ', num2str(den(5)), 's^2 + ',
num2str(den(6)), 's + ', num2str(den(7))];
app.C1Label.Text = ' ';
app.C2Label.Text = ' ';
app.C3Label.Text = ' ';
app.L1Label.Text = ' ';
app.L2Label.Text = ' ';
app.L3Label.Text = ' ';
app.C1Label.Text = sprintf('C1 = %.3e F',C1);
app.C2Label.Text = sprintf('C2 = %.3e F',C2);
app.C3Label.Text = sprintf('C3 = %.3e F',C3);
app.L1Label.Text = sprintf('L1 = %.3e H',L1);
app.L2Label.Text = sprintf('L2 = %.3e H',L2);
app.L3Label.Text = sprintf('L3 = %.3e H',L3);
zeros=zero(tf(num,den));
poles=pole(tf(num,den));
format shortG
p1=round(poles(1)); p1 = p1/100000;p1=round(p1,3);
p1=num2str(p1); p1=sprintf('p1 = %s e5',p1);
p2=round(poles(2)); p2 = p2/100000; p2=round(p2,3);
p2=num2str(p2); p2=sprintf('p2 = %s e5',p2);
p3=round(poles(3)); p3 = p3/100000;p3=round(p3,3);
p3=num2str(p3); p3=sprintf('p3 = %s e5',p3);
p4=round(poles(4)); p4 = p4/100000;p4=round(p4,3);
p4=num2str(p4); p4=sprintf('p4 = %s e5',p4);
p5=round(poles(5)); p5 = p5/100000;p5=round(p5,3);
p5=num2str(p5); p5=sprintf('p5 = %s e5',p5);
p6=round(poles(6)); p6 = p6/100000;p6=round(p6,3);
n1=round(zeros(1)*100)/100; n1=num2str(n1); n1=sprintf('z1 = %s',n1);
n2=round(zeros(2)*100)/100; n2=num2str(n2); n2=sprintf('z2 = %s',n2);
n3=round(zeros(3)*100)/100; n3=num2str(n3); n3=sprintf('z3 = %s',n3);
G=tf(num,den);
t = linspace(0,Tsim);
plot(app.UIAxes,t,y,"LineWidth",3,'Color','r');
app.UIAxes.XLim = [0 Tsim];
% Graf pre bode
wmin = app.wminEditField.Value;
wmax = app.wmaxEditField.Value;
[mag,phase,wout] = bode(G,{wmin,wmax});
semilogx(app.UIAxes2,wout,20*log10(squeeze(mag)),"LineWidth

```